



**UNIVERSIDADE DO MINHO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E RECURSOS DO MAR**

**CURSO DE LICENCIATURA EM
ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Tema: Desenvolvimento e Construção de um Concentrador Solar de
Disco Parabólico para Produção de Energia Elétrica**

Autor: Júlio César Medina, N.º 3839

Orientador: Doutor José Pedro Duarte Fonseca

Mindelo, 2019

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Desenvolvimento e Construção de um Concentrador Solar de Disco Parabólico para Produção de Energia Elétrica

Autor: Júlio César Medina, N.º 3839

Orientador: Doutor José Pedro Duarte Fonseca

Mindelo, 2019

Júlio César Medina

DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM CONCENTRADOR
SOLAR DE DISCO PARABÓLICO PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA

Projeto de trabalho de conclusão do curso,
apresentado à Universidade do Mindelo
como parte dos requisitos para obtenção do
grau de licenciado em Engenharia em
Energias Renováveis.

Orientador: José Pedro Duarte Fonseca

Mindelo 2019

Não creio que haja uma emoção, mais intensa para um inventor do que ver suas criações funcionando. Essa emoção faz você esquecer de comer, de dormir, de tudo.

Nikola Tesla

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que contribuíram para o término da minha jornada acadêmica, especialmente a minha mãe, irmãos, e toda a minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo, pelas risadas e apoio dado ao longo deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A concretização de todo o trabalho não seria possível sem o apoio e incentivo de algumas pessoas.

Primeiramente queria agradecer a minha mãe por toda a educação e os valores transmitidos, que me ajudaram a superar todos os meus desafios e sempre mostrou-se muito feliz com as minhas conquistas.

Agradeço também aos meus familiares aqui em Cabo verde e no estrangeiro que apesar de estarem longe, sempre motivaram-me para finalizar este trabalho com sucesso, transmitido sempre muita força.

Agradeço ao meu orientador José Pedro Duarte Fonseca, por todos os conhecimentos transmitidos, apoio prestado ao longo de todas as etapas deste projeto e pela disponibilidade.

Aos meus amigos e companheiros de curso que, desde o primeiro ano, estiveram presentes, e que de forma direta ou indiretamente, apoiaram-me no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Hernâny Monteiro que sempre esteve disponível em apoiar-me em casos de dúvidas que subsidiavam ao longo da elaboração do referido projeto, transmitindo palavras de incentivos e auxílio na elaboração do mesmo.

Um agradecimento especial aos meus colegas João Morais e Elvin Gomes e ao mecânico Otávio Fortes pelo apoio dado na construção do protótipo e ao Kelvin Graça pela disponibilidade apresentada na compra de alguns materiais em sites de compra e também no apoio na construção do protótipo.

Agradeço à Universidade do Mindelo, por me proporcionar um ambiente criativo e amigável para os estudos. Sou grato a cada membro do corpo docente pelos conhecimentos transmitidos, à direção e a administração dessa instituição de ensino.

RESUMO

A grande dependência energética face aos combustíveis fósseis, tem mobilizado grande parte da comunidade científica, cujos trabalhos são incansáveis em apontar soluções viáveis para o aproveitamento das energias renováveis.

O aproveitamento da energia solar é efetuada com o auxílio de várias tecnologias. Neste trabalho aborda-se os concentradores solares de disco parabólico que permitem o direcionamento da radiação solar para uma pequena área. Neste tipo de projeto a energia térmica é produzida a altas temperaturas e pressões. Essa energia concentrada possui grande aplicação, pois permite a conversão eficiente em energia elétrica, produzida em grupo motor/gerador Stirling.

O objetivo deste trabalho é construir e avaliar o desempenho de um sistema concentrador solar de disco parabólico, no acionamento de um motor Stirling, para produção de energia elétrica. Assim sendo, foi construído um concentrador parabólico e um seguidor solar com movimento em dois eixos, que permite o alinhamento do equipamento com a incidência dos raios Solares.

A leitura dos dados do sistema é realizada com um conjunto de sensores instalados no dispositivo, que são processados no microcontrolador Arduino e armazenados numa base de dados no Excel via o software PLX-QAQ.

Palavras-Chave: Concentrador solar disco parabólico, motor stirling, seguidor solar microcontrolador Arduino.

ABSTRACT

The great energy dependence on fossil fuels has mobilised a large part of the scientific community, whose work is tireless in pointing out viable solutions for the use of renewable energies.

The use of solar energy is made with the help of various technologies. The solar concentrators of the parabolic discs are placed in a way that allows the capture of solar rays of the Sun for a small area. In this type of project, thermal energy is produced at high temperatures and pressures. This concentrated energy has wide application because it allows efficient conversion into electrical energy produced in Stirling generator / engine group.

The objective of this work is to build and evaluate the performance of a solar parabolic disc concentrator system, to drive a stirling engine, for electric power production. Thus, it was i built a parabolic concentrator and a solar tracker with movement along in two axes, which allows the alignment of the equipment with the incidence of the solar rays.

The recording of the system data is performed with a set of sensors installed in the device, which are processed in the microcontroller Arduino and stored in a database in Excel with the software PLX-QAQ.

Keywords: parabolic disc solar concentrator, stirling engine, solar tracker, Arduino microcontroller.

ÍNDICE GERAL

DEDICATÓRIA.....	IV
AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XVII
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Contextualização Energética.....	20
1.2 Hipóteses.....	23
1.3 Objetivo Geral.....	23
1.4 Objetivos Específicos	23
1.5 Justificativa	23
1.6 Metodologia	24
CAPITULO II: ENERGIA SOLAR	26
2.1 RECURSO SOLAR	26
2.1.1 O Sol.....	26
2.1.2 Componentes Da Radiação Solar	27
2.1.3 Geometria Solar.....	27
2.1.4 Ângulos Solares	28
2.1.5 Radiação Solar Direta Em Uma Superfície Inclinação	29
2.1.6 Formas De Aproveitamento Do Recurso Solar.....	30
2.1.7 Recurso Solar Em Cabo Verde	30
2.2 ENERGIA SOLAR TÉRMICA.....	31
2.2.1 Coletores Solares.....	31
2.2.1.1 Coletor de placa plana (FPC)	32

2.2.1.2 Coletor de tubo vácuo (ETC)	32
2.2.1.3 Coletor parabólico composto (CPC).....	32
2.2.2 Concentradores Solares	32
2.2.2.1 Concentradores cilíndricos parabólicos (CCP)	33
2.2.2.2 Concentradores solar de disco parabólico (CDP).....	34
2.2.2.3 Central de torre	34
2.2.2.4 Concentradores fresnel.....	35
2.2.3 Vantagem E Desvantagem Dos Concentradores.....	35
CAPITULO III: CONCENTRADOR SOLAR DE DISCO PARABÓLICO (DISCO STIRLING).....	36
3.1 Sistemas Dish-Stirling	36
3.2 Componentes Do Concentrador Solar De Disco Parabólico	36
3.3 Concentrador Solar Parabólico	36
3.3.1 Materiais usados na construção do concentrador	37
3.3.2 Opções construtivas do concentrador	37
3.3.3 Comprimento focal e profundidade	38
3.3.4 Deslocamento do recetor do ponto focal	39
3.3.5 Diâmetro do recetor	40
3.3.6 Erros óticos	40
3.3.7 Razão de concentração.....	41
3.3.8 Rendimento ótico do concentrador.....	42
3.4 Recetor.....	43
3.4.1 Recetor de iluminação direta (RID).....	44
3.4.2 Recetores de refluxo	45
3.4.3 Temperatura teórica no recetor	46

3.5 Motor Stirling.....	46
3.5.1 Funcionamento do motor stiling.....	47
3.5.2 Potência teórica do motor stirling	48
3.5.3 Componentes de um motor stirling	49
3.6 Gerador Elétrico	52
3.7 Sistema De Rastreamento Solar	52
3.7.1 Altitude-azimute	53
3.7.2 Rastreamento polar	53
3.8 Balanço Energético De Um Concentrador Disco Parabólico	54
CAPITULO IV: DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	58
4.1 Descrição do Sistema	58
4.2 Concentrador.....	59
4.3 Distância focal.....	59
4.4 Recetor.....	60
4.5 Seguidor Solar.....	61
4.5.1 Configuração dos sensores LDR	62
4.5.2 Algoritmo do sistema de controlo	64
4.5.3 Seleção dos atuadores	67
4.5.4 Implementação do sistema de controlo.....	67
4.6 Motor Stirling.....	68
4.7 Análise Estrutural Do Sistema	69
4.7.1 Base suporte do concentrador	69
4.7.2 Veio	72
4.7.3 Torre	75
4.8 Balanço Energético Do Sistema.....	77

4.8.1	Rendimento ótico.....	77
4.8.2	Calor ótico.....	78
4.8.3	Temperatura teórica no recetor	78
4.8.4	Perdas de calor por radiação	80
4.8.5	Perdas de calor por convecção	80
4.8.6	Perdas globais e calor útil	81
4.8.7	Eficiência do concentrador, do recetor e potência elétrica	82
4.9	Instrumentação E Sistema Controle	83
4.9.1	Instalação do software PLX-DAQ.....	83
4.9.2	Esquema de ligação dos sensores no Arduíno	85
5	ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS	88
6	ANÁLISE ECONÓMICA DE UMA CENTRAL DISH STIRLING.....	90
7	IMPACTE AMBIENTAL	94
8	CONCLUSÃO	95
9	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	97
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
11	ANEXOS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principais produtores de energia pelos concentradores solar no mundo	21
Figura 2: Composição do espectro da radiação solar.....	26
Figura 3: Estações do ano.....	27
Figura 4: Ângulos Solares	29
Figura 5: Recurso Solar em Cabo Verde.....	30
Figura 6: Tipo de coletores solar fixo	31
Figura 7: Representação do fluxo de energia de um sistema CSP.	32
Figura 8: Tipos de sistemas CSP	33
Figura 9: Construção multifacetada com espelho de vidro	38
Figura 10: Concentrador membrana	38
Figura 11: Parâmetros de um concentrador parabólico	39
Figura 12: Calculo das distâncias para colocar o recetor.....	40
Figura 13: Fatores que favorecem a dispersão da radiação solar	42
Figura 14: Tipos de recetores	43
Figura 15: Recetor de iluminação direta.	44
Figura 16: Recetor de refluxo pool boiler	45
Figura 17: Recetor do tipo heat pipe de um motor Stirling.....	46
Figura 18: Etapas funcionamento do motor Stirling	48
Figura 19: Motor stirling V161	49
Figura 20: Sistema de aquecimento tubular	50
Figura 21: Sistema de refrigeração do motor Stirling modelo Solo V-161	50
Figura 22: Conversor AC/DC/AC para gerador síncrono íman permanente	52
Figura 23: Sistema de rastreamento altitude-azimute.....	53
Figura 24: Sistema de rastreamento polar	54
Figura 25: Balanço térmico de um concentrador de disco parabólico.....	54
Figura 26: Descrição do sistema.....	58
Figura 27: Representação das dimensões do concentrador.....	61
Figura 28: Desenho do protótipo no software SolidsWorks	62
Figura 29: Sistema de balanceamento de sombra nos LDR.....	63

Figura 30: Montagens dos 4 LDR com as palas de sombreamento.....	63
Figura 31: Circuito do divisor de tensão aplicado nos LDR	64
Figura 32: Algoritmo do sistema controle do seguidor solar	66
Figura 33: Servo motor	67
Figura 34: Circuito do seguidor solar	68
Figura 35: Motor stirling	69
Figura 36: Base suporte do concentrador	70
Figura 37: Força aerodinâmica atuante sobre o sistema	71
Figura 38: Distância entre o ponto de aplicação da força (concentrador) e o ponto de rotação do sistema.....	72
Figura 39: Resultado do Teste de von mises do veio em SolidWorks.....	74
Figura 40: Resultado do teste deslocamento do veio em SolidWorks.....	74
Figura 41: Resultado do Teste de von mises da torre em SolidsWorks.....	76
Figura 42: Resultado do teste deslocamento da torre em SolidsWorks.....	76
Figura 43: Menu opções do aviso de segurança	84
Figura 44: Janela para habilitar os macros	84
Figura 45: Interface de comunicação com Arduíno e PLX-DAQ	84
Figura 46: Interligação do sensor DHT22 com arruíno	85
Figura 47: Interligação do sensor termopar tipo K com Arduíno.....	86
Figura 48: Ligação do sensor velocidade encorder com Arduíno	87
Figura 49: Análise experimental do sistema construído	88
Figura 50: Torre construída	112
Figura 51: Fabricação da estrutura do concentrador.....	112
Figura 52: Montagem dos servomotores.....	113
Figura 53: Aplicação dos espelhos no concentrador	113
Figura 54: Estrutura de suporte do conjunto motor stirling/gerador	114
Figura 55: Instalação do motor stirling	114

ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 1: Matriz Energética Mundial em 2017	20
Gráfico 2: Crescimento da geração de energia elétrica através de fontes renováveis	21
Gráfico 3: Distribuição da energia elétrica consumida em Cabo Verde em 2016	22
Gráfico 4: Radiação solar incidente no concentrador	77
Gráfico 5: Radiação solar incidente no dia 3 Março de 2019	79
Gráfico 6: Variação do calor útil e das perdas no recetor desde o nascer ao pôr-do-sol no dia 3 Maio	81
Gráfico 7: Eficiência do concentrador e do recetor	82
Gráfico 8: Custo de energia em função dos anos	92
Gráfico 9: Receitas anuais em função dos anos do projeto	92
Gráfico 10: Ciclo termodinâmico do motor Stirling	106
Gráfico 11: Variação do coeficiente de arrasto em função das dimensões da elipse	110

ÍNDICE TABELAS

Tabela 1: Erros típicos encontrados nos concentradores Solar	41
Tabela 2: Tipos de materiais do regenerador e outras propriedades.....	51
Tabela 3: Dimensões da parábola	59
Tabela 4: Dados do concentrador	60
Tabela 5: Propriedades mecânicas do aço galvanizado	70
Tabela 6: Calor ótico medio diário no recetor em cada mês do ano:.....	78
Tabela 7: Temperatura teórica no recetor desde o nascer até o pôr-do-sol.....	79
Tabela 8: Perdas calor por radiação em função da temperatura teórica.....	80
Tabela 9: Perdas por convecção	81
Tabela 10: Custo do protótipo	87
Tabela 11: Resultado da análise experimental do sistema	89
Tabela 12: Custo de um sistema Dish Stirling de 500 kW	90
Tabela 13: Especificações técnicas do PowerDish	91
Tabela 14: Viabilidade económica	93
Tabela 15: Custo dos componentes do concentrador solar de disco parabólico	109
Tabela 16: Custo de instalação do motor stirling funcionado com energia solar	109
Tabela 17: Custo de operação do motor Stirling funcionado a energia solar.....	109

ÍNDICE QUADRO

Quadro 1: Produtores de energia em Cabo Verde	104
Quadro 2: Análise da viabilidade económica de um sistema disco Stirling	108

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC- Alternating Current (Corrente Alternada)

A_{con} - Área do concentrador

AEB- Águas e Energias de Boavista

APP- Águas de Ponta Preta

Ar- Área do recetor

B_0 - Número Beale

B: Inclinação

C-Razão de concentração

°C- Graus Celcius

CCP- Concentradores Cilíndricos Parabólicos

CDP- Concentradores de Disco parabólico

C_h - Altura do projeto do recetor

CTE- Coletores De Tubo Evacuado

CPC- Coletores Parabólico Composto

DC- Direct current (Corrente Contínua)

D_f : Distância de projeto do recetor

DNEIC-Direção Nacional da Energia, Indústria e Comércio

f:- Distância focal

F- Erro de dispersão

F_a -Força aerodinâmica

FPC- Coletores placas planas

f_r -Frequência de rotação

GEE- Gases Efeito de Estufa

G_{sc} - Constante solar

G_{on} - Radiação solar Extraterrestre

h- Altura da parábola

I_b - Radiação direta

I_d - Radiação Difsa

IEA- International Energy Agency

$^{\circ}\text{K}$ - Graus Kelvin

KW- Kilowatt

L- Longitude

LDR- Light Dependent Resistance (Resistência dependente da Luz)

mm- Milímetro

MWh- Megawatt hora

P_{SE} - Potência Elétrica

P_{med} - Pressão média

Q_s - Calor recebido do sol

$Q_{\text{ótico}}$ - Calor ótico

RID- Recetor de iluminação direta

SES- Stirling Energy Systems

SPI-Serial peripheral interface

T_R - Temperatura no recetor

T_f -Temperatura fria

T_q -Temperatura quente

Letras Gregas

α - Absortividade

γ - Ângulo azimutal da superfície

θ - Ângulo de incidência

ω - Ângulo horário

θ_z - Ângulo de zénite

σ - Constante de Stefan-Boltzmann

δ - Declinação

ε -emissividade

γ_g - Fator de configuração geométrica

ϕ - Latitude

ρ - Refletividade

τ -Transmitância

ΔV - Variação de volume.

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A energia assume um papel central nos modelos de desenvolvimento socioeconómico modernos. Satisfazer a procura de energia no momento e no local em que ela seja necessária, é um dos principais desafios com que a sociedade é confrontada desde o início do século XXI (Lavado, 2009).

Nos últimos anos, com o crescimento da população mundial e consequentemente o aumento da demanda energética, que se baseia essencialmente na queima de combustíveis fósseis, tem evidenciado diversos efeitos negativos no meio ambiente (poluição atmosférica, fenómenos naturais catastróficos, aquecimento global, aumento do nível da água do mar), o que motivou muitas pessoas e empresas a investirem em alternativas energéticas limpas e eficientes, uma delas a energia solar, que tem um excelente potencial para ser explorado (Cantor, 2008).

De acordo com Lavado (2009), existe uma forte tendência a nível mundial para os países diminuírem a dependência dos combustíveis fósseis, motivada pela necessidade de controlar as emissões de gases efeito de estufa (GEE) para a atmosfera.

Assim sendo, busca-se neste projeto não somente a construção de um sistema de geração de energia, mas também contribuir para um futuro melhor no planeta.

Existem várias formas de aproveitar a energia solar, onde o objetivo principal é convertê-la em energia térmica e/ou elétrica. Neste trabalho aborda-se uma tecnologia que permite usar energia solar para produzir energia mecânica, que é o motor de Stirling, sendo depois convertida em energia elétrica no gerador.

A utilização do sistema concentrador solar e motor Stirling é uma das tecnologias solar térmica usada atualmente, junto com a tecnologia de concentradores cilíndricos parabólicos e central de torre. O concentrador solar de disco parabólico é usado para coletar os raios solares que aquecem o fluido do motor Stirling através do foco do concentrador parabólico, permitindo o funcionamento do mesmo (Bravo, *et al.*, 2011).

1.1 Contextualização Energética

No estudo realizado pela International Energy Agency (IEA) (2010), haverá um aumento significativo da demanda energética no mundo até 2050. Este relatório projetou diversos cenários possíveis entre os anos de 2007 e 2050. Em um cenário mais conservador previu que o consumo de energia primária no mundo crescerá até 84% neste período. Entretanto, esse mesmo cenário prevê que o uso da energia fóssil crescerá em um ritmo muito lento, a energia nuclear e as renováveis apresentarão um crescimento elevado neste período.

De acordo com o IEA (2018), 81,1% da energia consumida a nível mundial no ano de 2017, foi proveniente da queima de combustíveis fósseis, sendo que a energia geotérmica, eólica, solar, ondas e marés, correspondem apenas 1,7%, conforme pode ser visualizado no Gráfico 1.

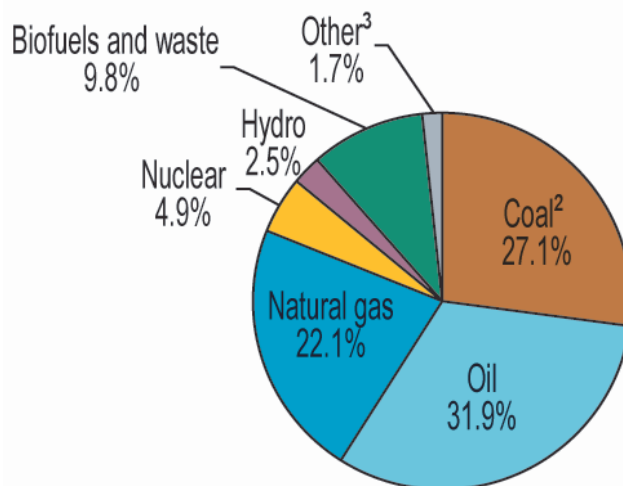


Gráfico 1: Matriz Energética Mundial em 2017

Fonte: IEA, 2018

Constata-se que a energia solar gerada pelos módulos fotovoltaicos ou através da concentração da energia, apresenta expressivo crescimento, juntamente com a energia eólica (Gráfico 2). A participação das energias renováveis, segundo esta previsão chegará a 48% da matriz energética mundial em 2050 (IEA, 2018).

Para ter uma dimensão da importância da energia solar no cotidiano da humanidade, é necessário saber que o Sol fornece à Terra impressionantes 120 000 TW de potência. Isso

significa que uma hora de incidência solar, supera toda a quantidade de energia utilizada no Planeta durante um ano. Nenhuma outra fonte fornece essa quantidade de energia de forma incessante e espontânea (Morton, 2006).

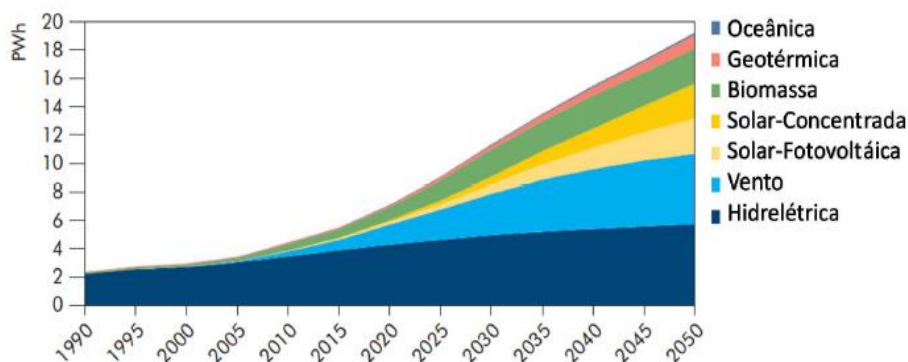


Gráfico 2: Crescimento da geração de energia elétrica através de fontes renováveis

Fonte: IEA, 2010

Os Estados Unidos e Espanha já utilizam há muito tempo estas tecnologias de concentradores solares para produção de energia elétrica (Holbert e Haverkamp, 2009). Na Figura 1 mostra os principais produtores de energia pela tecnologia dos concentradores solares.

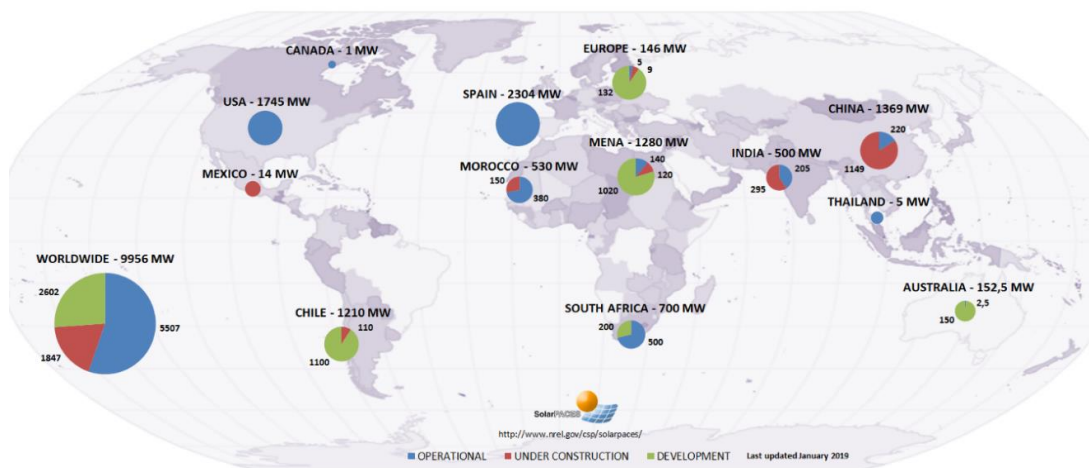


Figura 1: Principais produtores de energia pelos concentradores solar no mundo

Fonte: SolarPaces, 2018

No caso de Cabo Verde, o setor energético é caracterizado por uma forte dependência da importação dos derivados do petróleo, constituídos por gásóleo, fuelóleo, Gás de Petróleo

Liquefeito (GPL-Butano) e gasolina. Apesar do importante potencial das energias renováveis endógenas existente no país, os derivados do petróleo contribuíram em 2016 com cerca de 80,3% na oferta total de energia primária. A contribuição das energias renováveis (solar, eólica), na energia consumida em Cabo Verde foi de 18,7% (Gráfico 3). A energia solar contribui com 1,4% da energia consumida em Cabo Verde em 2016.

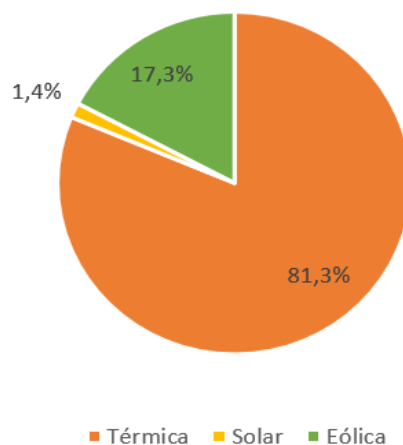


Gráfico 3: Distribuição da energia elétrica consumida em Cabo Verde em 2016

Fonte: DNEIC¹, 2016.

A principal empresa a operar no setor elétrico em Cabo Verde é a empresa de eletricidade e água – Electra S.A., empresa pública que tem desde 2000 a concessão da rede de distribuição e gere as maiores centrais de produção. A exceção é a ilha da Boavista onde opera a empresa público-privada Águas e Energia de Boavista (AEB) como subconcessionária do serviço público. Na ilha do Sal opera desde 2005, a empresa Águas de Ponta Preta (APP).

Na área das energias renováveis o maior produtor de energia elétrica de origem eólica é a Cabeólica, S.A., uma empresa de parceria público-privada que iniciou a sua atividade em Cabo Verde em 2009 com a instalação de 4 parques eólicos, num total de 25,5 MW, nas ilhas de São Vicente, Sal, Boavista e Santiago. A empresa privada Electric Wind desenvolveu e tem explorado um Parque Eólico de 2 unidades de 250 kW cada na ilha de Santo Antão e em São Vicente explora o parque eólico da Electra que é equipado com 3 aerogeradores de 300

¹ Direção Nacional da Energia, Indústria e Comércio

KVA. No Anexo 1 é apresentado os principais produtores de energia e as respetivas potências instaladas.

1.2 Hipóteses

- ✓ O aquecimento do motor stirling através do concentrador solar de disco parabólico é suficiente para o seu funcionamento com rotação constante;
- ✓ Existe energia suficiente para ser aproveitada e convertida em energia elétrica;
- ✓ Este é um meio economicamente viável para a produção de energia.

1.3 Objetivo Geral

- Construir e avaliar o desempenho de um concentrador solar de disco parabólico, no acionamento de um motor Stirling, para produção energia elétrica.

1.4 Objetivos Específicos

- Identificar as formas de produzir energia elétrica por meio dos concentradores solares;
- Descrever os princípios óticos referentes ao concentrador solar, com propósito de aquecimento do motor stirling;
- Avaliar os processos termodinâmicos que envolvem o ciclo de funcionamento do motor Stirling;
- Construir um sistema de posicionamento em relação ao Sol, com movimentação em dois eixos independentes;
- Mostrar a viabilidade do uso do motor Stirling na produção de energia elétrica a partir do aquecimento solar.

1.5 Justificativa

Cabo Verde tem enfrentado vários problemas relacionadas ao fornecimento de energia, devido ao isolamento e a reduzida dimensão do mercado energético que utiliza combustíveis fósseis para produzir energia. Esta situação faz com que a economia energética do país esteja fortemente dependente da instabilidade dos mercados petrolíferos. Sendo assim, deve procurar fontes alternativas de energia, de modo a reduzir os elevados custos da importação de combustíveis fósseis.

Cabo Verde é um país com grande potencial para a implementação de centrais de concentradores solar, por causa das grandes áreas com disponibilidade de radiação solar.

Entre os concentradores solar, o sistema disco Stirling apresenta maior eficiência na produção de energia elétrica, chegando a 29,4% com o uso do motor Stirling no foco, seguido por um máximo de 20% das torres solares e 16% das calhas parabólicas (Castellanos, 2012).

No ano de 2008 Stirling Energy Systems (SES) alcançou uma eficiência de 31,25%, nos Estado Unidos, superando o recorde anterior de 29,4%. O engenheiro chefe do projeto afirmou que o principal responsável pelo novo recorde foi o avanço alcançado na qualidade dos espelhos parabólicos, que tem a capacidade de refletir 94% da energia recebida diretamente no motor Stirling (Sandia, 2001).

O calor solar não é o único meio para alimentar o motor Stirling, pode ser usado calor de qualquer processo de combustão. Combinado com um queimador de biogás o sistema permite produzir eletricidade durante a noite e não havendo a emissão de CO₂.

1.6 Metodologia

Para a realização do trabalho efetuou-se pesquisas bibliográficas em livros, artigos científicos e em teses para melhor conhecimento do tema em estudo, que sustentará todo o estudo de caso do projeto a ser desenvolvido.

No estudo de caso, será efetuado o dimensionamento do sistema e de seguida o desenho do projeto no software SolidWorks e análise da estabilidade mecânica de todo o sistema.

O concentrador terá um sistema de controlo, onde será utilizado o microcontrolador Arduino para fazer a leitura dos dados dos sensores instalados. Realizado o código no Arduino, os dados são apresentados no Excel.

1.7 Estrutura Do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido em capítulos:

No capítulo I apresenta-se uma breve introdução ao estudo do sistema, a contextualização energética, as hipóteses, os objetivos, a justificativa e a metodologia usada.

No Capítulo II ilustra-se uma breve introdução ao estudo do recurso solar, tecnologias para o aproveitamento da energia solar para a produção de energia elétrica e aquecimento.

No Capítulo III faz-se a caracterização do concentrador solar de disco parabólico, definindo-se o seu potencial, funcionamento e constituição. É efetuada uma breve explicação do motor Stirling, analisando o seu princípio de funcionamento, ciclo termodinâmico, constituição e as tipologias de seguidores solares utilizados nos sistemas disco stirling.

No Capítulo IV realiza-se a modelação do sistema, apresentando as metodologias seguidas para o dimensionamento dos componentes do mesmo.

Por último conclui-se o trabalho realizado, apresentando-se as relações retiradas do potencial energético do dimensionamento feito, impactes ambientais e análise da viabilidade económica.

CAPITULO II: ENERGIA SOLAR

2.1 RECURSO SOLAR

2.1.1 O Sol

O Sol é basicamente uma enorme esfera de gás incandescente, no seu núcleo acontece a geração de energia através da fusão nuclear do núcleo do hidrogénio em hélio. O Sol, devido à sua elevada temperatura dentro de suas diferentes camadas, pode ser aproximado a um corpo negro de temperatura de 5777 °K. A energia gerada pelo sol, sob a forma de radiação, suporta quase todas as formas de vida na terra através da fotossíntese (Incropera *et al.*, 2008).

De acordo com Pereira (2010), com resultado das fusões nucleares, o Sol liberta para o espaço grandes quantidades de energia eletromagnética (energia radiante), a qual atinge a superfície do planeta Terra sob três formas principais:

- 55% sob a forma de raios infravermelhos;
- 42% sob a forma de radiações dentro do espectro do visível;
- 3% sob a forma de raios ultravioletas, radiações de pequeno comprimento de onda.

A capacidade de energia transmitida por uma onda está diretamente associada à sua frequência, logo quanto maior a frequência maior será a energia transmitida. O conjunto de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol chama-se de espectro da radiação solar, onde apenas uma pequena parte deste espectro é visível a olho nu, chamado de luz visível (Figura 2) (Carvalho, 2013).

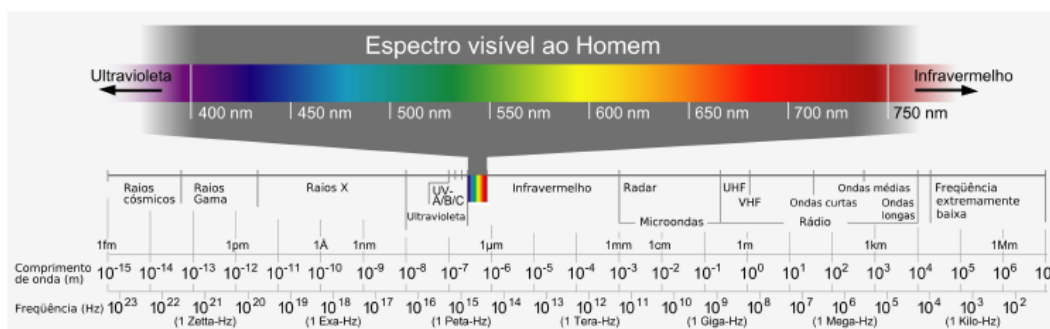


Figura 2: Composição do espectro da radiação solar.

Fonte: Carvalho, 2013

2.1.2 Componentes Da Radiação Solar

A radiação global que atinge um plano localizado na superfície terrestre pode ser decomposta em três componentes (Severo, 2005):

- Radiação direta (I_B): é a radiação que chega à superfície vinda diretamente do disco solar (cerca de 70% do total da radiação);
- Radiação difusa (I_D): originada pelos raios não diretos e dispersos pela atmosfera, ou seja, ela é dispersa pelas nuvens e poeiras em suspensão (cerca de 28% do total da radiação);
- Radiação refletida: constituída pela parcela de radiação que é refletida ao atingir o solo (cerca de 2% do total da radiação).

2.1.3 Geometria Solar

A terra em seu movimento em torno do Sol, descreve uma trajetória elíptica com pequena excentricidade. O seu eixo, em relação ao plano normal à elipse, apresenta uma inclinação de aproximadamente $23,45^\circ$. Essa inclinação, juntamente com o seu movimento de translação, origina as estações do ano (Figura 3) (Madeira, 2009).



Figura 3: Estações do ano

Fonte: Madeira, 2009

De acordo com Kalogirou (2013), observando-se o movimento aparente do Sol, ao meio dia solar, ao longo do ano, verifica-se que o ângulo entre os raios solares e o plano do Equador varia $+ 23,45$ em torno do dia 21 de junho (solstício de verão no hemisfério norte), $-23,45$

em 21 de dezembro (solstício de inverno no hemisfério Norte) e nos equinócios os raios solares alinham com o plano do Equador.

2.1.4 Ângulos Solares

Para aproveitar a radiação solar na geração de energia, é necessário conhecer e descrever a posição e o movimento do Sol em relação à Terra e as superfícies recetoras dessa radiação. Para tanto uma série de ângulos são definidos bem como a relação entre eles, como mostra a Figura 4 (Goswami, 2000):

Latitude (ϕ): é a distância angular medida sobre a superfície da Terra a partir do Equador até o ponto em questão. É considerada positiva no Hemisfério Norte e negativa no Hemisfério Sul ($-90^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$);

Longitude (L): arco do Equador compreendido entre o meridiano que passa por Greenwich e o meridiano que passa no observador;

Declinação (δ): é a posição angular do Sol, ao meio dia, em relação ao plano do Equador. Ao norte do Equador, a declinação é positiva ($-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$);

Inclinação (β): é o ângulo entre o plano da superfície em estudo e o plano horizontal ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$);

Ângulo azimutal da superfície (γ): é o desvio da projeção da radiação solar no plano horizontal da normal à superfície, a partir do meridiano local, tem o valor 0 quando indica o Sul, para este é negativo e para oeste é positivo ($-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$);

Ângulo de incidência (θ): é o ângulo entre a radiação direta na superfície e a sua normal;

Ângulo horário (ω): é a distância angular entre o feixe da radiação solar e o meridiano local. É considerado negativo no período da manhã e positivo no período da tarde. Cada hora do dia corresponde a uma variação de 15° .

Ângulo de zênite (θ_z): é o ângulo formado entre o feixe de radiação solar e a vertical do local.

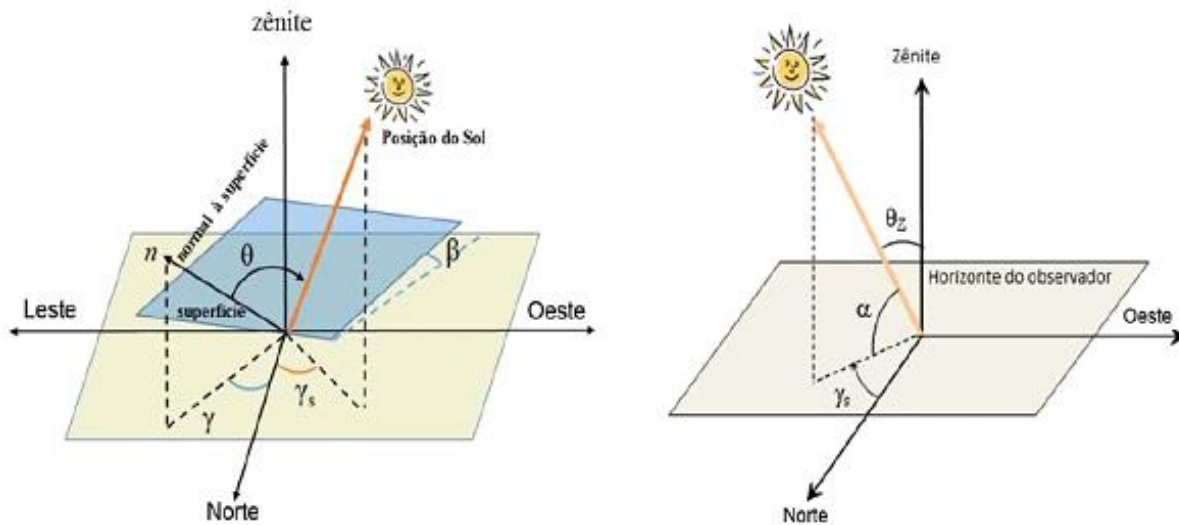


Figura 4: Ângulos Solares

Fonte: Pinho e Galdino, 2014

2.1.5 Radiação Solar Direta Em Uma Superfície Inclinada

Para realizar o cálculo da radiação solar direta em uma superfície inclinada temos que ter em consideração a transmissividade da atmosfera para a radiação direta, que é calculada com base na Equação 1 (Duffie e Beckman, 2013):

$$\tau_b = \alpha_0 + \alpha_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right) \quad (1)$$

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (2)$$

A radiação direta em uma superfície inclinada é calculada pela Equação 3 (Duffie e Beckman, 2013). Nos concentradores solares de disco parabólico o ângulo de incidência é igual a 0, logo $\cos \theta = 1$.

:

$$G = G_{on} \cdot \tau_b \cdot \cos \theta \quad (3)$$

Onde: G_{on} - Radiação solar fora da atmosfera

2.1.6 Formas De Aproveitamento Do Recurso Solar

Atualmente podem ser considerado os seguintes tipos de aproveitamento da energia solar: conversão fotovoltaica, conversão térmica, conversão biológica, transferência de energia para o potencial eólico e energia dos oceanos (Goswami, 2000).

Segundo o mesmo autor na conversão fotovoltaica, utiliza-se a célula fotovoltaica, que converte em energia elétrica a energia proveniente da radiação solar. Ela é constituída por materiais semicondutores com diferentes polaridades, de forma a criar uma diferença de potencial elétrica.

A conversão térmica consiste no aproveitamento da energia do sol sob a forma de calor para aquecimento de água, secagem de produtos e produção de energia elétrica através de processos termodinâmicos (Pereira, 2010).

2.1.7 Recurso Solar Em Cabo Verde

O resultado sumário da caracterização do recurso solar nas ilhas de Cabo Verde é dado pelo mapeamento da radiação global, que se apresenta na Figura 5.

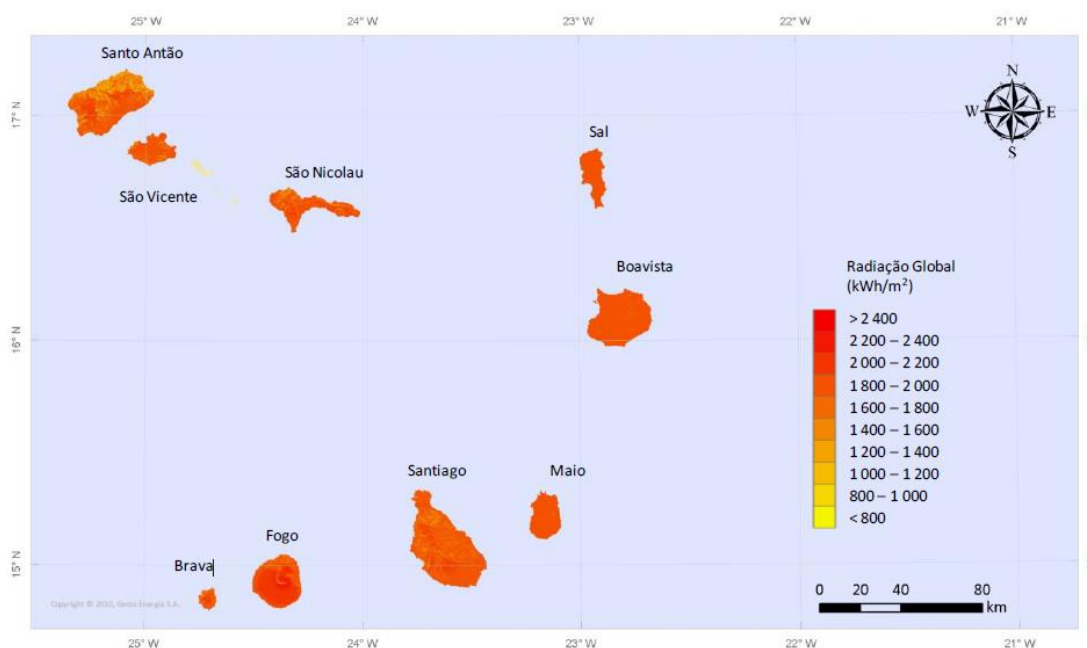


Figura 5: Recurso Solar em Cabo Verde

Fonte: Gesto Energy Solutions, 2011

Com base no estudo realizado pela Gesto Energy Solutions (2011), do mapeamento do recurso solar, conclui-se que Cabo Verde tem um recurso solar abundante. Em termos de média anual, grande parte do território apresenta uma radiação global entre os 1 800 e os 2 000 kWh/m²/ano.

Neste estudo ainda concluiu-se que, relativamente ao número de horas de sol no território, mais de metade apresenta um potencial de mais de 3.750 horas de sol por ano.

2.2 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

Segundo Foster *et al.* (2010), a energia solar térmica tem sido usada há séculos pelos antigos para o aquecimento e secagem. Mais recentemente, em uma ampla variedade de processos térmicos, como para a produção de energia, aquecimento de água, secagem mecânica de culturas e dessalinização de água.

2.2.1 Coletores Solares

Um coletor solar é um tipo especial de trocador de calor que transforma a radiação solar em calor. No coletor solar, a transferência de energia é de uma fonte distante (o Sol) para um fluido (Duffie e Beckman, 2013).

De acordo com Kalogirou (2013), há 3 tipos de coletores solares fixos (Figura 6): Coletor de placa plana (FPC), Coletor parabólico composto (CPC) e Coletor de tubo de vácuo (ETC).



Figura 6: Tipo de coletores solar fixo

Fonte: Rodrigues, 2017

2.2.1.1 Coletor de placa plana (FPC)

Os coletores planos possuem uma placa absorvedora de metal, dentro de uma caixa retangular plana. Possuem isolamento térmico, que isolam a parte inferior e os lados do coletor. Na parte superior existe uma cobertura transparente (Foster *et al.*, 2010).

2.2.1.2 Coletor de tubo vácuo (ETC)

Coletores de tubos vácuo são compostos por tubos de vidro transparentes, dispostos em paralelo, contendo no seu interior um absorvedor coberto por um filme seletivo, que absorve a radiação solar. O vidro é utilizado para criar vácuo, de forma a reduzirem as perdas de calor (Klein, 1978).

2.2.1.3 Coletor parabólico composto (CPC)

Eles podem ser estacionários ou móveis. Os coletores do tipo CPC podem aceitar a radiação solar em diferentes ângulos. É caracterizado por vários elementos que favorecem a reflexão da maior parte da radiação solar para o tubo absorvedor localizado no fundo do coletor (Kalogirou, 2013).

2.2.2 Concentradores Solares

A tecnologia da energia solar térmica concentrada, conhecida como CSP, consiste em usar concentradores para focar a radiação solar em um receptor, que em seguida aquece um fluido de transferência, que será transferido para o bloco de potência onde será gerada a eletricidade ou a produção de vapor para utilizar nas indústrias (Bianchini, 2013). A Figura 7 apresenta um diagrama esquemático simplificado do fluxo de energia nos CSP.

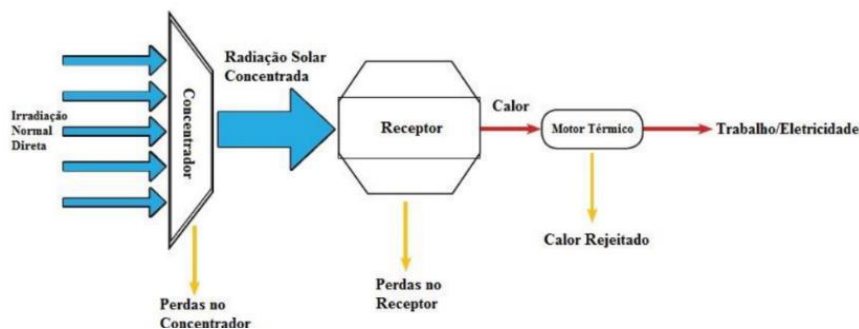


Figura 7: Representação do fluxo de energia de um sistema CSP.

Fonte: Mille e Lumby, 2012

Atualmente há quatro geometrias de concentradores solares: cilindro parabólico, central de torre, disco parabólico e o Fresnel, Figura 8 (Barreto, 2015).

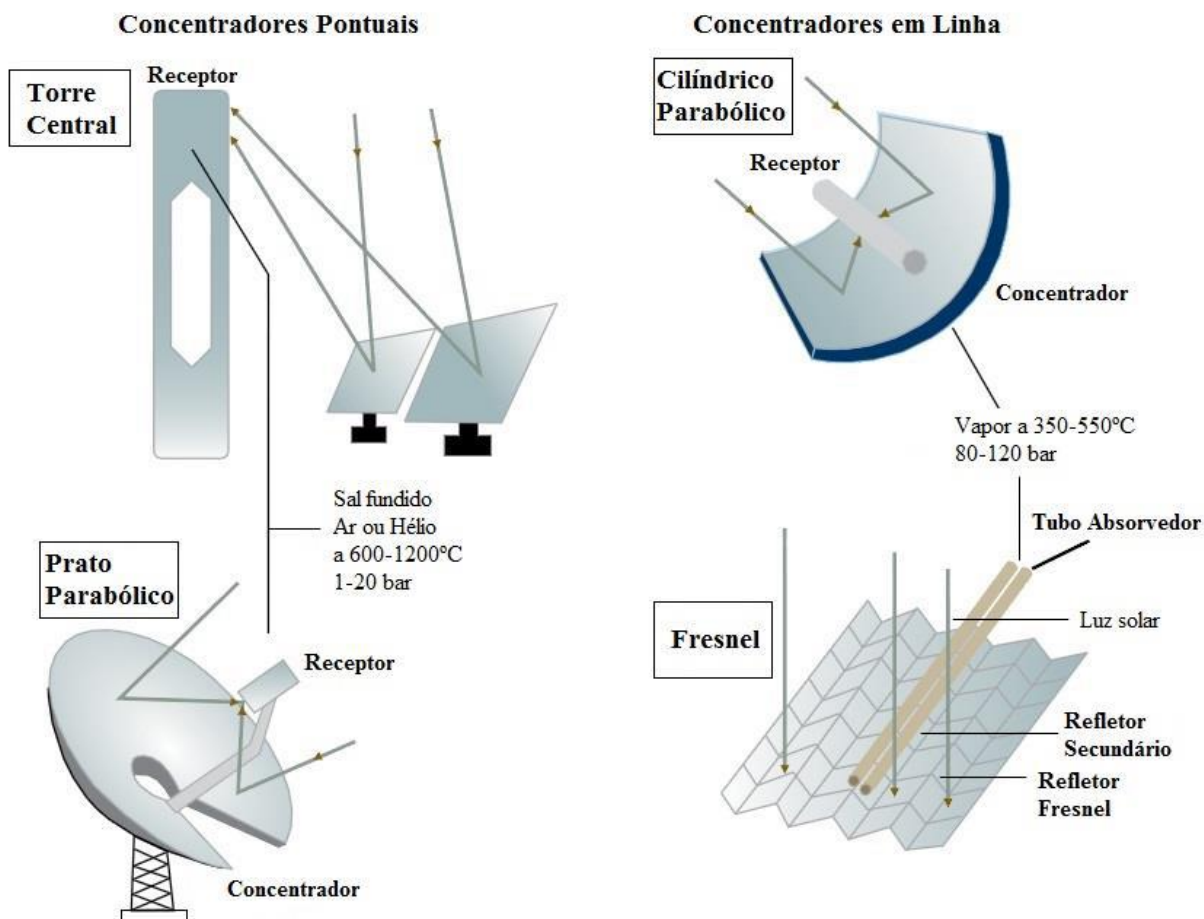


Figura 8: Tipos de sistemas CSP

Fonte: Mille e Lumby, 2012

2.2.2.1 Concentradores cilíndricos parabólicos (CCP)

Os concentradores cilíndricos parabólicos são revestidos por um material refletor em formato parabólico, sobre um tubo absorvedor revestido de negro. O tubo absorvedor recolhe a radiação solar, converte esta radiação em calor e transfere o calor ao fluido de transferência térmica (Kalogirou, 2013).

Posteriormente, o fluido térmico atravessa os permutadores de calor onde é produzido vapor sobreaquecido (tipicamente a 100 bar e 370 °C), que eventualmente produzirá o trabalho

necessário para a produção de energia elétrica, por meio de uma turbina de vapor e do ciclo de Rankine (Zarza e Hennecke, 2000).

Para ter uma melhor eficiência do concentrador deve haver um espaço entre o vidro e o tubo absorvedor, criando vácuo para evitar perdas de calor e tem um seguidor solar de 1 eixo (Duffie e Beckman, 2013).

2.2.2.2 Concentradores solar de disco parabólico (CDP)

O concentrador parabólico reflete a radiação solar para um recetor, que é localizado no seu ponto focal. A radiação solar é absorvida pelo permutador de calor (recetor), aquece o gás de trabalho do motor Stirling, a temperaturas de 650°C. Este calor é convertido em energia mecânica no motor Stirling. Um gerador elétrico, diretamente conectado ao motor, converte a energia mecânica em eletricidade (Goswami, 2000).

2.2.2.3 Central de Torre

Em sistemas de torre, um campo de helióstatos ou espelhos móveis, possuem um sistema de seguimento do sol em dois eixos, refletem a radiação solar para concentrá-la até 600 vezes em um recetor localizado no topo da torre. Esse calor é transmitido a um fluido com o objetivo de gerar vapor que se expande uma turbina acoplada a um gerador para a produção de eletricidade com base no ciclo termodinâmico de Rankine ou de Brayton (Mille e Lumby, 2012).

Nas centrais de torre solar existem dois tanques, um frio e um quente, onde é armazenado o fluido de trabalho (sal fundido²). O sal líquido é bombeado para o recetor onde é aquecido e armazenado no tanque quente, sendo depois usada para produzir energia elétrica. Com a energia térmica suficiente armazenada, torna-se possível produzir energia elétrica, mesmo nas horas em que não há sol (Bianchini, 2013).

² É um sal que passa do estado sólido para o estado líquido através de um processo de aquecimento. Ele é usado em usinas CSP para gerar vapor ou armazenar energia em forma de calor para uso posterior.

2.2.2.4 Concentradores Fresnel³

Nessa tecnologia utiliza-se espelhos longos e retangulares, dispostos paralelamente, com capacidade de seguimento do sol em um eixo e concentra a radiação solar em um tubo estacionário, colocado alguns metros acima, como mostra a Figura 8. A água que corre neste tubo passa para o estado vapor, o qual é enviado para um grupo Turbina-Gerador (Morton, 2006).

2.2.3 Vantagem E Desvantagem Dos Concentradores

Com base no autor que tenho vindo a citar, os concentradores solares em relação aos coletores planos apresenta inúmeras vantagens e desvantagens que são apresentados abaixo:

2.2.3.1 Vantagens

- O fluido de transferência térmica pode alcançar altas temperaturas no absorvedor, traduzindo numa alta eficiência termodinâmica;
- Com os concentradores é possível alcançar uma excelente relação termodinâmica entre a temperatura do fluido térmico e a temperatura requerida;
- A eficiência térmica é maior por causa da reduzida perda de calor na área de absorção.
- As superfícies refletoras são mais acessíveis, exigem menos material e são estruturalmente simples em relação a outros materiais usados em outras tecnologias.

2.2.3.2 Desvantagens

- Só aproveitam pequena parte da radiação difusa dependendo do grau de concentração;
- Sistemas de rastreamento normalmente instalados encarecem o custo desses sistemas;
- As superfícies refletoras perdem a capacidade refletora com o tempo e requerem manutenção constante, nomeadamente a limpeza e polimento.

³ Esta tecnologia deve o seu nome ao facto do sistema usar um conceito muito semelhante ao sistema ótico inventado pelo físico Francês Augustin-Jean Fresnel.

CAPITULO III: CONCENTRADOR SOLAR DE DISCO PARABÓLICO (DISCO STIRLING)

Neste capítulo pretende-se efetuar uma abordagem geral sobre os princípios fundamentais do concentrador solar a ser usado no projeto, no qual engloba-se o estudo geométrico e ótico do concentrador, a modelação térmica do recetor, motor Stirling e seguidor solar.

3.1 Sistemas Dish-Stirling

Os sistemas Dish-Stirling são pequenas unidades de geração de energia, usando a radiação solar. A capacidade de uma única unidade é geralmente entre 3 a 25 kW. O tamanho e a modularidade qualificam o sistema Dish-Stirling de grande flexibilidade para muitas aplicações. Eles são ideais para aplicações independentes ou outras aplicações descentralizadas (Bravo, *et al.*, 2011).

Em 2010, Tessera Solar e Stirling Energy Systems lançaram o primeiro projeto piloto de CSP Stirling na Maricopa Arizona-EUA. Esta planta solar consta de 60 disco solar SunCatcher de 25 kW, com uma capacidade de gerar 1,5 MW. A vantagem deste sistema é que não usa água para gerar eletricidade, apenas uma quantidade mínima para operações da instalação e para a limpeza dos espelhos (Mille e Lumby, 2012).

3.2 Componentes Do Concentrador Solar De Disco Parabólico

De acordo com Hafez *et al.* (2015), o concentrador solar de disco parabólico é dividido em:

1. Concentrador solar parabólico;
2. Trocador de Calor (Recetor);
3. Motor Stirling com o gerador.
4. Sistema de rastreamento.

3.3 Concentrador Solar Parabólico

A radiação solar refletida por um concentrador depende da sua geometria. Para altas concentrações a paraboloide de revolução é a melhor opção, permitindo a concentração dos raios solares no foco, que são paralelos ao eixo da abertura (Schweitzer *et al.*, 1992).

3.3.1 Materiais usados na construção do concentrador

Na construção dos concentradores solar são aplicados os seguintes materiais refletivos:

- Alumínio: colocado na parte superior do disco parabólico, suas superfícies apresentam um coeficiente de reflexão de 95% e também tem uma maior durabilidade (Castellanos, 2012).
- Superfícies de polímeros: De acordo com Abbas (2000) esse concentrador possui baixo custo, boa flexibilidade e coeficiente de reflexão de 96%. No entanto suas propriedades (mecânicas e óticas) são comprometidas quando o material fica exposto por muito tempo ao sol.
- Folha de alumínio polido: apresenta um custo reduzido, mas as suas desvantagens estão relacionadas com uma refletividade moderada (85%) e uma baixa resistência a tempestades (Abbas, 2000).
- Concentrador de membrana reflexiva esticada: películas finas de plástico ou metal são esticadas por meio de um aro ou argola, na qual uma segunda película é colocada atrás da primeira. Geralmente são usadas em discos parabólicos com menor diâmetro (Fraser, 2008).

3.3.2 Opções construtivas do concentrador

O concentrador pode ser construído em uma grande superfície contínua, como o concentrador da Figura 10, ou um conjunto de refletores menores, não diretamente conectados, que são fixados em uma estrutura, como na Figura 9.

Em uma construção multifacetada, cada faceta tem as suas próprias características de curvatura e orientação de acordo com sua posição dentro do sistema, e cada faceta é individualmente alinhada. Uma construção multifacetada tem a vantagem de não ser necessário construir uma grande superfície paraboloide. Estes concentradores precisam apenas de uma curvatura esférica muito pequena para ter uma aproximação suficientemente de uma paraboloide (Stirling Energy Systems, 2007).

Os pratos que consistem em uma superfície paraboloide contínua podem ser feitos de uma peça grande, ou podem ser compostos de diferentes segmentos que estão conectados entre si.

Se eles são feitos de uma peça grande é usada uma película refletiva de membrana. Se eles são feitos de segmentos, é escolhida uma estrutura de espelho (Simmers, 2001).



Figura 9: Construção multifacetada com espelho de vidro

Fonte: Stirling Energy Systems, 2007



Figura 10: Concentrador membrana

Fonte: Bergermann e Partner, 2001

3.3.3 Comprimento focal e profundidade

Thakkar *et al.* (2015), definiram o comprimento focal do concentrador (f) como a distância do vértice ao foco como mostra a Figura 11. A distância focal está relacionada com o diâmetro do concentrador e a profundidade do disco parabólico. No cálculo do comprimento focal usa a Equação 4.

$$f = \frac{D_{con}}{4 \tan\left(\frac{\Phi_r}{2}\right)} \quad (4)$$

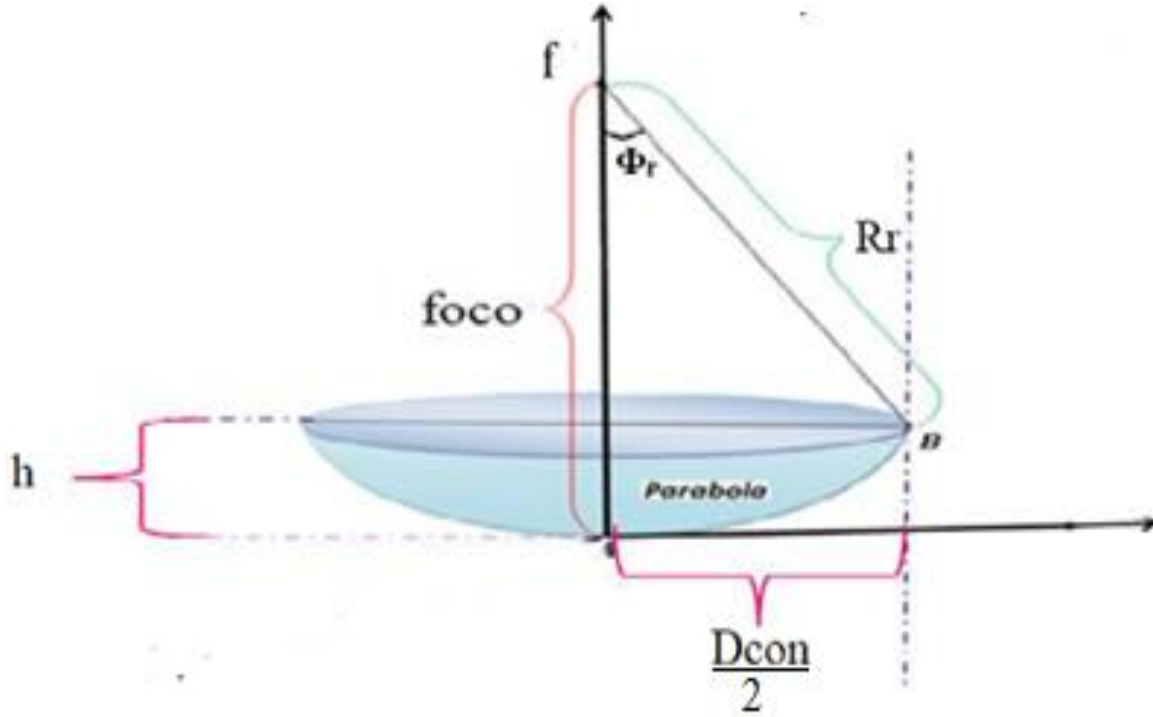


Figura 11: Parâmetros de um concentrador parabólico

Fonte: Castellanos, 2012

A profundidade do concentrador solar é calculada de acordo com a Equação 5:

$$h = \frac{D_{con}^2}{16f} \quad (5)$$

3.3.4 Deslocamento do recetor do ponto focal

Para determinar a distância que garante uma distribuição uniforme da radiação solar sobre a superfície do recetor, mostrado na Figura 12, aplica-se a Equação 6 (Ghani *et al.*, 2014).

$$D_f = (f - h) \frac{D_r}{D_{con}} \quad (6)$$

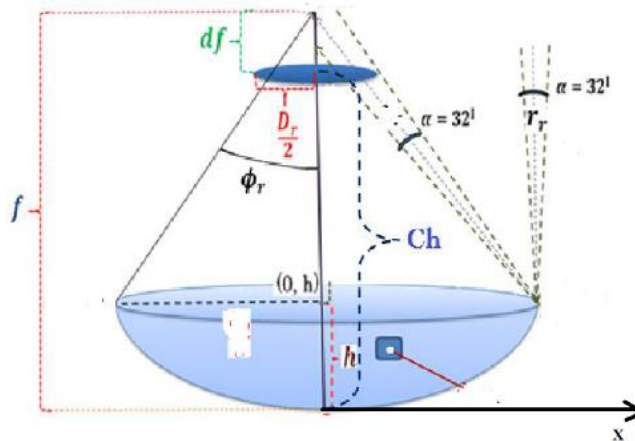


Figura 12: Calculo das distâncias para colocar o recetor

Fonte: Castellanos, 2012

Onde:

f : Distância focal [m]

C_h : Altura do projeto do recetor [m]

D_r : Distância de projeto do recetor [m]

h : Altura da parábola [m]

D_r : Diâmetro do recetor [m]

3.3.5 Diâmetro do recetor

De acordo com Castellanos (2012), o calculo do diâmetro do recetor pode ser calculado em função do diâmetro do concentrador, considerando que a radiação solar ao incidir no recetor contém um ângulo de dispersão de $0,267^\circ$ sendo assim usa a Equação 7.

$$D_r = \frac{D_{con} \cdot \sin(0,267^\circ)}{\sin(\Phi_r) \cdot \cos(\Phi_r + 0,267^\circ)} \quad (7)$$

3.3.6 Erros óticos

Os erros óticos, que resultam das imperfeições do concentrador solar, devem ser considerados, uma vez que contribuem para a dispersão da radiação solar refletida sobre a

área focal. Estes erros representam o parâmetro σ_{Total} . Os erros mais comuns encontrados nos concentradores solares são apresentados na Tabela 1 (Barbosa, 2015).

Tipo de erro	Derivação padrão do erro σ
Estrutura (Inclinação)	$(2,5 \text{ mrad}) \times 2$
Sensor de monitorização	2 mrad
Acompanhamento de monitorização	2 mrad
Refletividade	$(0,25 \text{ mrad}) \times 2$
Alinhamento do recetor	2 mrad
Condições Climatéricas	2,8 mrad

Tabela 1: Erros típicos encontrados nos concentradores solar

Fonte: Barbosa, 2015

Aplicando a Equação 8 e tendo em conta todos os valores dos erros apresentados, é possível calcular o erro total. O valor obtido é de 6,71 miliradianos.

$$\sigma_{total} = \sqrt{(2 \cdot \sigma_{incl})^2 + \sigma_{sensor}^2 + \sigma_{acomp}^2 + \sigma_{alinh}^2 + (2 \cdot \sigma_{refle})^2 + \sigma_{Sol}^2} \quad (8)$$

3.3.7 Razão de concentração

A razão de concentração num concentrador é dada em função da geometria do recetor. Cada tipo de recetor tem uma forma particular de intercepar a radiação solar, obtendo-se diferentes distribuições de energia por unidade de área. A radiação solar direta encontra-se suportada num cone angular $=32'$ ou $=0,53^\circ$, isto é devido à distância de $1,495 \times 10^{11}$ que há entre Terra-Sol (Duffie e Beckman, 2013).

De acordo com o mesmo autor, a razão de concentração é definida como a rácio entre a área de abertura e a área do recetor, Equação 9:

$$C = \frac{A_{abertura}}{A_{recetor}} \quad (9)$$

Para calcular a concentração máxima em um concentrador é considerado a dispersão angular no recetor, que é causado pelo rastreamento solar inadequado, rugosidade na superfície do coletor (má qualidade no polimento do espelho) e erro na curvatura do concentrador, como mostra a Figura 13 (Holbert & Haverkamp, 2009).

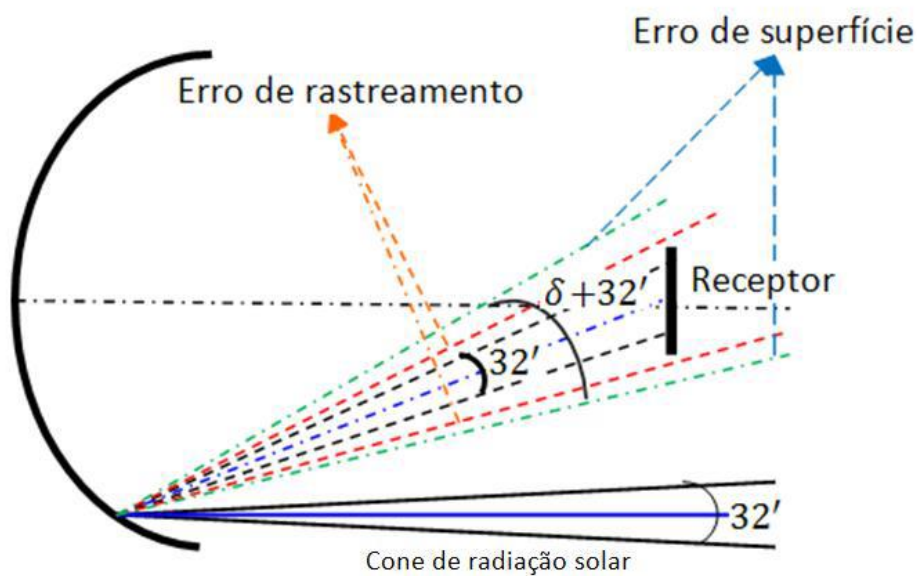


Figura 13: Fatores que favorecem a dispersão da radiação solar

Fonte: Castellanos, 2012

O índice de concentração máxima é limitado por outros fatores, tais como a absorvidade e refletividade (Howard, 2010).

3.3.8 Rendimento ótico do concentrador

A principal forma de qualificar o desempenho da superfície do concentrador é quantificando a radiação que incide na superfície e que foi refletida para o recetor. Esta medida é conhecida como eficiência ótica do concentrador e pode ser expressa pela Equação 10 (Fareed e Auatf, 2012).

$$\text{Eficiência}_{\text{ótica}} = f_s \cdot \gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot F \quad (10)$$

f_s - Fator de não sombreamento

ρ - Refletividade

γ - Fator de configuração geométrica

α - Absortividade do recetor,

τ - Transmitância do vidro que envolve o recetor (se existir).

F- Erro de dispersão

O produto do fator de não sombreamento pelo fator de configuração geométrica é dado pela Equação 11:

$$f_s \cdot \gamma = \frac{\sin^2 \Phi_r - \sin^2 \Phi_{min}}{4 \tan^2 \left(\frac{\Phi_r}{2} \right)} \quad (11)$$

3.4 Recetor

No recetor ocorre as trocas de calor entre a superfície absorvora e o fluido de trabalho do motor stirling. Em geral, dois tipos de geometrias de recetores podem ser usados nos concentradores solar de discos parabólicos são: recetores externos e recetores de cavidades, como indica a Figura 14 (Barbosa, 2015).

De acordo com o mesmo autor os recetores externos são geralmente esféricos e absorvem a radiação proveniente de diferentes direções. Recetores de cavidade têm uma abertura através do qual a radiação solar passa e é absorvida pelo motor.

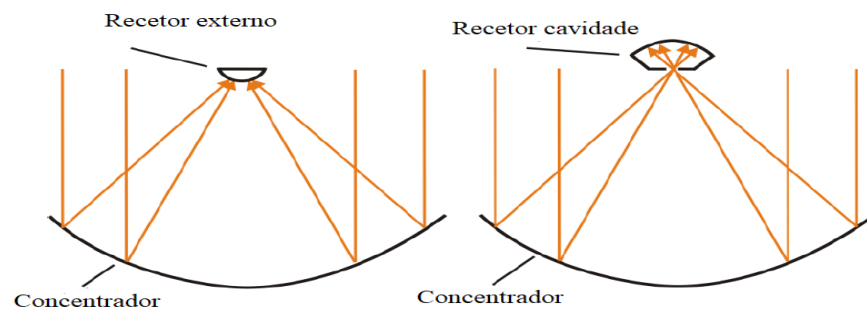


Figura 14: Tipos de recetores

Fonte: SolarPaces, 2018

As perdas de calor por radiação, nos recetores externos desprotegidos, são elevadas a altas temperaturas de operação. Em um recetor de cavidade, uma grande parte da radiação emitida permanece dentro da cavidade e é absorvida novamente, de modo que as perdas de calor por radiação seja menor. A absorção efetiva da cavidade é maior que a absorção da sua superfície interna. Isto é possível devido à forma côncava da superfície do absorvedor. Além disso, as perdas de calor por convecção também é menor em recetores de cavidades do que em recetores externos (Stine e Geyer, 2001).

Recetores externos têm sido usados nos concentradores de disco parabólicos que operam em uma temperatura mais baixa. Nos concentradores que funcionam a altas temperaturas, apresentam diferentes tipos de recetores de cavidades. Estes são divididos em recetores de iluminação direta (RID) e refluxo (Barbosa, 2015).

3.4.1 Recetor de iluminação direta (RID)

Nos recetores de iluminação direta apresentado na Figura 15, possuem uma cavidade com um orifício, em que nas paredes internas da cavidade encontra-se o trocador de calor. Segundo Caballero (2013), o trocador de calor é formado por pequenos tubos com diâmetros aproximadamente 3 mm, nos quais desloca o fluido de trabalho em altas pressões, entre 5-20 MPa, com temperaturas entre 650°C e 850°C. Este recetor é muito utilizado em sistemas Dish Stirling.

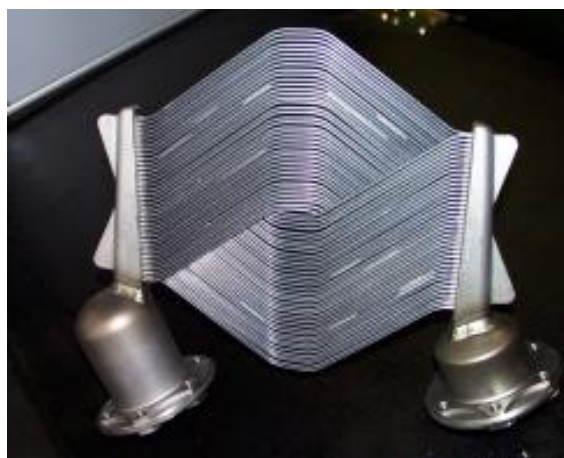


Figura 15: Recetor de iluminação direta.

Fonte: Caballero, 2013

3.4.2 Recetores de refluxo

Os recetores de refluxo utilizam um fluido interno intermediário dentro do recetor, geralmente de sódio, para transferência de calor. Ele sofre evaporação na superfície do absorvedor e condensa nos tubos do fluido de trabalho, retornando a superfície do recetor. Recetores de refluxo podem ser classificados em dois tipos: Pool Boiler e Heat Pipe (Blasco, 2011).

3.4.2.1 Recetor pool boiler

Espaços semiesféricos são cheios de fluido líquido (sódio) que ficam sempre em contato com a superfície do absorvedor, conforme mostra a Figura 16 (Coventry *et al.*, 2015).

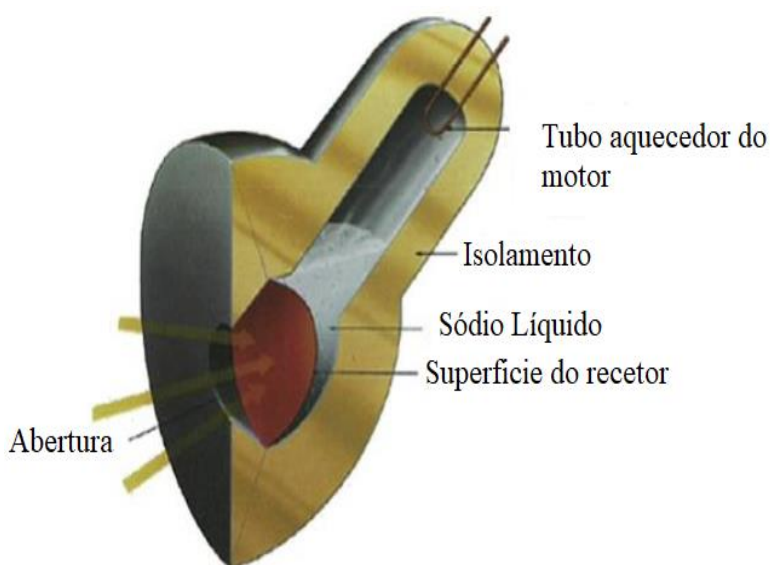


Figura 16: Recetor de refluxo pool boiler

Fonte: Coventry *et al.*, 2015

3.4.2.2 Recetor Heat Pipe

No recetor da Figura 17 o fluido intermediário sofre evaporação, sendo transportado para a zona de aquecimento do motor, onde sofre condensação. A temperatura nesse recetor é mais constante, o que leva a um aumento na temperatura do fluido de trabalho, melhorando consecutivamente a eficiência do sistema (Mancini, *et al.*, 2003).

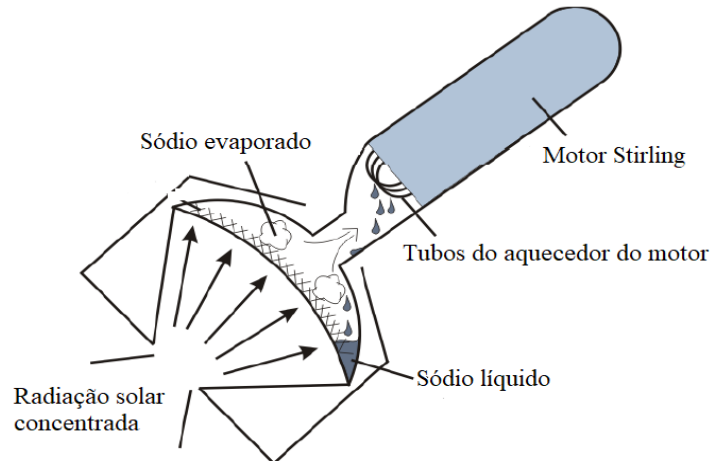


Figura 17: Recetor do tipo heat pipe de um motor Stirling

Fonte: Mancini *et al.*, 2003

3.4.3 Temperatura teórica no recetor

Para o cálculo da temperatura máxima teórica do recetor usa a Equação 12, uma vez que o cálculo é efetuado em função do calor ótico, emissividade do material usado para construir o recetor e a razão de concentração (Castellanos, 2012).

$$T_r = \sqrt[4]{\frac{C \times Q_{otico}}{\varepsilon \cdot \sigma}} \quad (12)$$

Onde:

C-razão de concentração

ε -emissividade

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

3.5 Motor Stirling

De acordo com Urieli (2008), o ciclo Stirling é o mais eficiente ciclo termodinâmico para transformar o calor em energia mecânica. O motor Stirling foi inventado em 1826 pelo Escocês Robert Stirling. O motor Stirling tem algumas extraordinárias propriedades tais como:

- Comparado a um motor Otto ou Diesel, que funciona com combustão interna, o motor Stirling depende apenas do fornecimento de calor externo, sem preferência como o calor é gerado.
- No motor Stirling, uma quantidade constante de gás de trabalho (hélio ou hidrogénio) é constantemente aquecido e resfriado. Devido à expansão quando o gás é aquecido e contração quando o gás é resfriado, põe dois pistões em movimento, ambos estão conectados a uma cambota produzindo assim energia.
- A eficiência do motor Stirling aumenta com o aumento da temperatura do processo. Este motor é a combinação ideal para produzir energia com concentradores solares.
- Como não há combustão interna, este motor produz quase nenhum ruído. Devido à flexibilidade da fonte de calor, um motor Stirling também pode ser operado com um recetor híbrido.

3.5.1 Funcionamento do motor stiling

Um motor Stirling consiste em um sistema termicamente fechado com dois cilindros (cilindros de expansão e compressão) preenchidos com um gás de trabalho (hélio ou hidrogénio). Os pistões desses cilindros estão conectados a uma cambota. Quando o gás de trabalho no cilindro de expansão (cilindro de trabalho) é aquecido (pelo sol), expande devido ao aumento da temperatura, empurrando o pistão para baixo (1-2) induzindo uma força. Parte dessa força é usado para empurrar o fluído de trabalho do cilindro de expansão em direção ao cilindro de compressão (2-3). Em sua rota, o gás de trabalho atravessa o regenerador, onde a maior parte do seu calor é armazenado. Então o gás passa por um resfriado e é refrigerado a água (2-3). Uma vez que o gás de trabalho está completamente no cilindro de compressão, este pistão sobe devido à inércia da cambota, comprimindo o gás de trabalho a baixa temperatura (3-4). O gás retorna ao cilindro de trabalho, reabsorvendo o calor liberado no regenerador (4-1) (Bergermann e Partner, 2001).

Na Figura 18 é apresentado em detalhe as 4 etapas do ciclo termodinâmico do motor stirling.

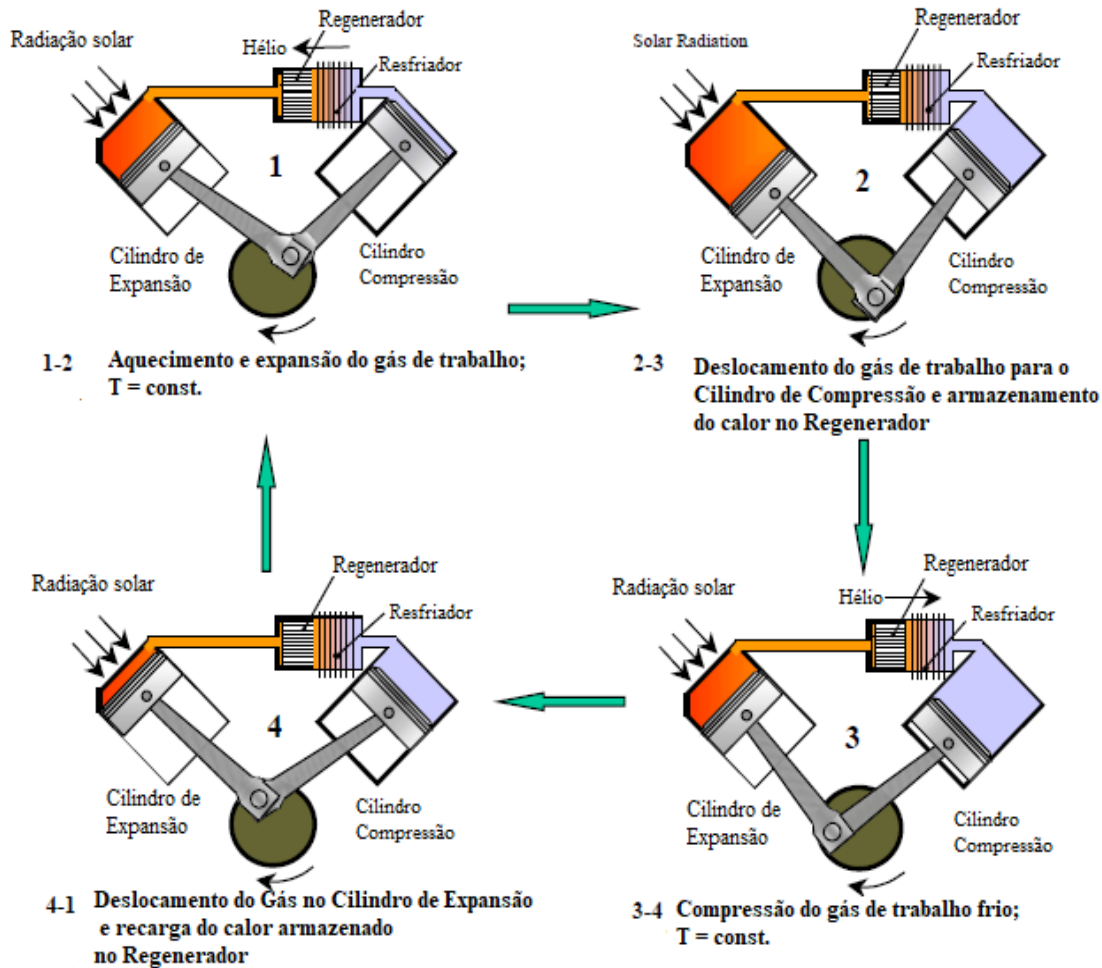


Figura 18: Etapas funcionamento do motor Stirling

Fonte: Adaptado de Bergermann e Partner, 2001

3.5.2 Potência teórica do motor stirling

A estimativa da potência de um motor pode ser feita pelas inúmeras expressões empíricas formuladas ao longo da sua evolução. Uma dessas expressões é a que resulta das observações de William Beale, que relaciona algumas características básicas do motor, Equação 13 (Walker, 2002):

$$P = B_0 \cdot P_{med} \cdot V \cdot f \quad (13)$$

Sendo B_0 uma variável denominada de número de Beale, tipicamente com o valor de 0,015; P_{med} a pressão média do ciclo; f a frequência de rotação e ΔV a variação de volume ocorrido.

Mais tarde a equação de Beale foi reformulada por Colin West, que substituiu o número de Beale por uma outra variável, o número de West ($W_n = 0,25$). Esta Equação contempla a influência das temperaturas das fontes de calor quente (T_q) e fria (T_f) (Hoegel, 2014).

$$P = W_n \cdot P_{med} \cdot f \cdot \Delta V \cdot \frac{T_q - T_f}{T_q + T_f} \quad (14)$$

3.5.3 Componentes de um motor stirling

Na Figura 19 mostra os principais componentes do motor stirling.

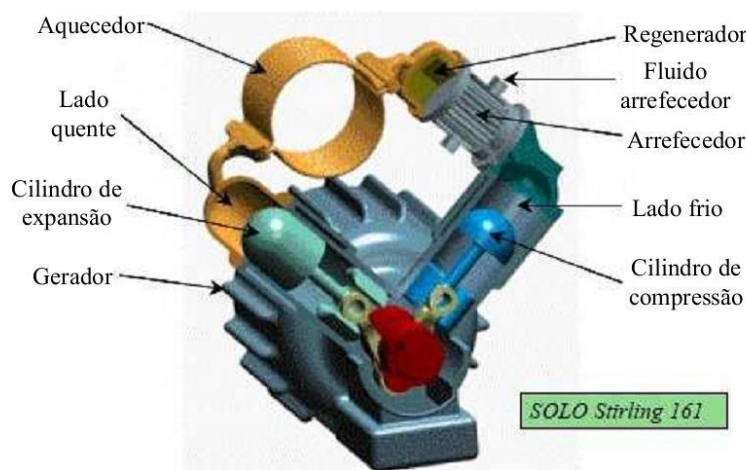


Figura 19: Motor stirling V161

Fonte: Santos , 2014

3.5.3.1 Sistema de aquecimento

O aquecedor tem como função transferir o calor para o fluído de trabalho, fazendo-o expandir. Esse trocador de calor é difícil de projetar em razão das diferentes situações de funcionamento em seu interior e exterior, como também da fonte de calor utilizada. A fonte quente no motor Stirling pode ser gerada com a queima de diversos combustíveis como gás natural, biogás, biomassa ou por meio da radiação solar (Costa, 2013). No aquecedor mostrado na Figura 20 o fluído de trabalho fica dentro de tubos com diâmetros relativamente pequenos, onde o calor é transmitido nas paredes do tubo (Isaac, 2002).



Figura 20: Sistema de aquecimento tubular

Fonte: Isaac, 2002

Por trabalhar em altas temperaturas, os materiais devem ser bem resistentes, como ligas metálicas e cerâmicas refratárias. Superligas podem permitir o funcionamento do aquecedor em temperaturas de 750 a 850 °C, enquanto materiais refratários permitem que ele trabalhe em temperaturas acima de 1125 °C (Bowman *et al.*, 2004).

3.5.3.2 Sistema de Resfriamento

De acordo com Ramos (2015), a refrigeração é tão importante quanto o aquecedor, pois retira o calor do fluido de trabalho. Geralmente os motores Stirling podem ser refrigerados a ar ou a água. Este trocador de calor é geralmente de tubos, conforme mostra a Figura 21.



Figura 21: Sistema de refrigeração do motor Stirling modelo Solo V-161

Fonte: Ramos, 2015

3.5.3.3 Regenerador

O regenerador é um dos componentes mais importantes do motor Stirling e está posicionado entre a fonte quente e a fonte fria do motor (Costa, 2013). A função do regenerador é absorver o calor gerado no aquecimento quando o fluido de trabalho se desloca para a área de resfriamento. A energia absorvida é transferida novamente para o fluido quando o mesmo se deslocar em sentido contrário. A eficiência do motor Stirling é afetada pelo desempenho do regenerador, o qual é complexo e difícil de modelar e projetar. Na Tabela 2 indica alguns materiais usados para fabricar o regenerador.

Material do regenerador	Capacidade Calorífica (J/m ³ .K)	Condutividade (W/m.K)
Aço	3,846.10 ⁶	46
Aço inoxidável	3,545.10 ⁶	15
Cobre	3,397.10 ⁶	289
Latão	3,145.10 ⁶	100
Alumínio	2,322.10 ⁶	200

Tabela 2: Tipos de materiais do regenerador e outras propriedades

Fonte: Costa, 2013

De acordo com Abete (2013) a porosidade da matriz do regenerador é uma característica muito importante, que está relacionada com a perda de carga. Quando ocorre uma diminuição da porosidade, aumenta-se o atrito e as perdas de carga no regenerador.

De acordo com Gheith *et al.* (2014), as matrizes de cobre-níquel e de cobre apresentam boa eficiência térmica, mas os materiais sofreram oxidação rápida. O regenerador de alumínio tem uma eficiência razoável, contudo, seu uso é limitado pelo ponto de fusão do material. Os resultados mostraram que a matriz de aço inoxidável com 85% de porosidade apresentou a melhor performance do sistema, por maximizar os desempenhos do motor e minimizar as perdas de calor no regenerador.

3.6 Gerador Elétrico

O gerador elétrico permite transformar a energia mecânica produzida no motor stirling em energia elétrica. Nos sistemas de concentradores de disco parabólico, os motores stirling funcionam com velocidade de rotação variável. Quando as variações na velocidade são superiores a 10%, deve utilizar geradores de velocidade variável. Dentro da categoria de geradores de velocidade variável destaca-se os geradores assíncronos duplamente alimentados e geradores síncronos de ímãs permanentes conectados diretamente à rede (Caballero, 2013).

No gerador assíncrono, as variações da velocidade do rotor são compensadas pelo ajuste da corrente. A presença do conversor ao lado do rotor permite o controlo da potência ativa e reativa, permitindo um melhor comportamento para a rede (Esteve, 2010).

De acordo com o mesmo autor citado acima no gerador síncrono de íman permanente, a sua ligação a rede elétrica é feita através de um sistema conversor AC/DC/AC como mostra a Figura 22. A utilização de um tipo especial de gerador síncrono, com um número elevado de pares de polos, permite ao gerador acompanhar a velocidade de rotação do motor stirling.



Figura 22: Conversor AC/DC/AC para gerador síncrono íman permanente

Fonte: Esteve, 2010

3.7 Sistema De Rastreamento Solar

Sistemas de concentrador solar de disco parabólico necessitam de mecanismo de rastreamento solar, para que possam absorver toda a radiação solar fornecida em um dia. Os seguidores solar aplicados nos sistemas disco stirling podem ser divididos em 2 grupos: os de Altitude-azimute e de Rastreamento polar (Günther e Shahbazfar, 2009).

3.7.1 Altitude-azimute

No rastreamento solar altitude-azimute da Figura 23 possui um eixo para a orientação horizontal (na direção leste-oeste) e o outro para a orientação vertical. A orientação do concentrador é via o ângulo de altitude e ângulo de azimute (Cortez, 2013).

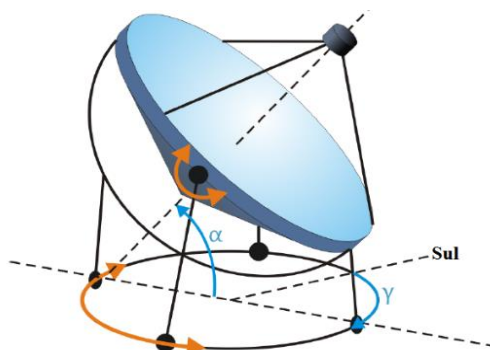


Figura 23: Sistema de rastreamento altitude-azimute

Fonte: Günther e Shahbazfar, 2009

Este tipo de seguimento recebe informação dos sensores nele instalado, que por sua vez recebe a informação acerca da posição do sol a partir da radiação solar recebida. Estes sensores fotossensíveis podem ser foto sensores (por exemplo o LDR), foto díodos e foto transístores. Neste tipo de controlo é colocado um sensor igual em cada eixo de modo a garantir leituras idênticas (Günther e Shahbazfar, 2009).

De acordo com o mesmo autor citado acima, o sistema apresenta uma base rotacional permitindo girar 360 graus. Também possui rotação no suporte do concentrador, fornecendo movimento para cima e para baixo ao concentrador parabólico. Esse sistema é o mais utilizado e é conhecido como sistema de dois eixos, pois permite o movimento tanto horizontal como vertical.

3.7.2 Rastreamento polar

Um eixo tem a direção do eixo rotacional da Terra e o outro é perpendicular a ele. A determinação resultante da orientação do concentrador é via ângulo de hora e declinação. Este sistema de rastreamento corresponde, portanto, ao sistema de coordenadas equatoriais (Figura 24) (Cortez, 2013).

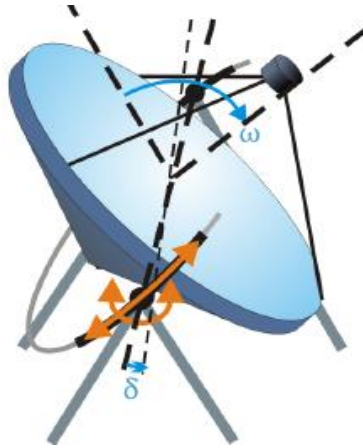


Figura 24: Sistema de rastreamento polar

Fonte: Günther e Shahbazfar, 2009

Segundo Cortez (2013), o controlador é programado com algoritmos de cálculo da posição do Sol em função do dia, hora e ano, sendo também considerados parâmetros como o declive terrestre e a latitude. A este tipo de seguimento podem ser acopladas funções que permitem a movimentação da estrutura em função do clima exterior.

3.8 Balanço Energético De Um Concentrador Disco Parabólico

De acordo com Thakkar *et al.* (2015), o balanço térmico de um sistema de concentrador solar de disco parabólico é feita com base na Figura 25.

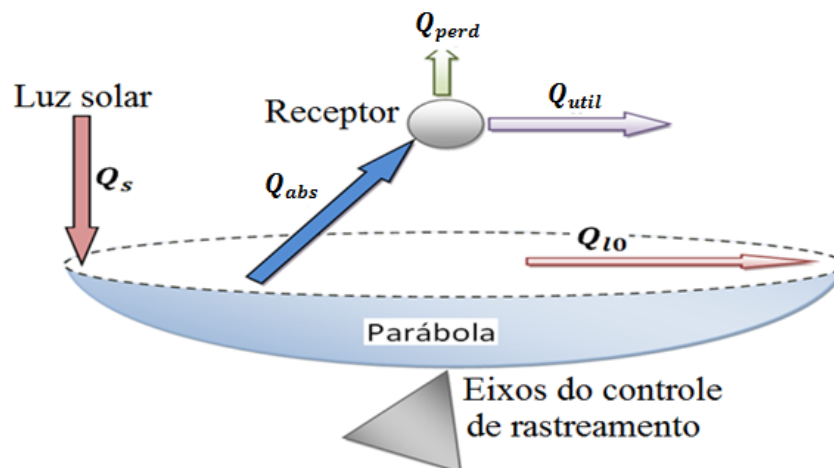


Figura 25: Balanço térmico de um concentrador de disco parabólico

Fonte: Thakkar *et al.*, 2015

O calor efetivamente recebido pela radiação solar no concentrador é dado pela Equação 15.

$$Q_s = G_b \times A_{con} \quad (15)$$

A radiação solar absorvida pelo recetor pode ser estimada a partir da radiação solar no concentrador e das características óticas do concentrador e do recetor:

$$Q_{ótico} = \eta_{ótico} \times Q_s \quad (16)$$

As perdas de calor no recetor para o ambiente, são resultantes de três processos de transferência de calor, condução, convecção e radiação e é dada pela Equação 17.

$$Q_{perdas} = Q_{Radiação} + Q_{convecção} + Q_{Condução} \quad (17)$$

De uma forma geral as perdas de calor por radiação, pode ser calculado através da Equação 18. Estas perdas estão associadas à temperatura da superfície do recetor, sendo tanto maiores quanto mais elevada for a temperatura do mesmo.

$$Q_{Radiação} = \sigma A_r (T_r^4 - T_a^4) \quad (18)$$

Dos diferentes processos de transferência de calor do recetor para o meio ambiente, a convecção é o processo que envolve as maiores perdas, em que as perdas por condução podem ser desconsideradas. As perdas calor por convecção calcula-se pela Equação 19 (Bancha e Somchai, 2005).

$$Q_c = h_c A_r (T_r - T_a) \quad (19)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção depende da velocidade do vento, e o cálculo é influenciado pelo acabamento da superfície do coletor e da incidência do fluxo de

ar. Para superfícies lisas onde um fluxo de ar incide na superfície do recetor, o cálculo do coeficiente de convecção é calculado através da Equação 20 (Duffie e Beckman, 2013):

$$h_c = 2,8 + 3 \cdot V \quad (20)$$

Reunidas todas as condições, é possível calcular as perdas de calor globais, tendo em conta o coeficiente global de perda de calor.

$$Q_{perdas} = U_L A_r (T_r - T_a) \quad (21)$$

$$U_L = h_c + h_r \quad (22)$$

Realizando a substituição temos que o Q_{Util} é dado pela Equação 23.

$$Q_{Util} = \eta_{ótico} \times G_b \times A_{con} - U_L (T_r - T_a) \times A_r \quad (23)$$

A eficiência térmica do concentrador solar de disco é definida pelo rácio entre o calor útil transferido para o fluido e o calor total capturado pela superfície refletora, (Equação 24). Sendo A_{con} a área de abertura do concentrador e G_b a radiação solar incidente (Barbosa, 2015).

$$\eta_{con} = \frac{Q_{Util}}{G_b \cdot A_{con}} \quad (24)$$

Quanto à eficiência térmica do recetor, é caracterizada pelo rácio entre o calor útil que o recetor consegue transferir para o fluído pelo calor ótico refletido pelo concentrador, Equação 25 (Ghani *et al*, 2014).

$$\eta_r = \frac{Q_{Util}}{\eta_{ótico} \cdot G_b \cdot A_{con}} \quad (25)$$

A eficiência total do sistema é dada pela Equação 26 (Iwamoto *et al*, 2001).

$$\eta_{Total} = \eta_{con} \cdot \eta_r \cdot \eta_{SE} \cdot \eta_G \quad (26)$$

A potência elétrica na saída dos sistemas de disco parabólico é dada pela Equação 27 (Mancini, *et al.*, 2003):

$$P_{SE} = \eta_{Total} \cdot G_b \cdot A_{con} \quad (27)$$

CAPITULO IV: DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

4.1 Descrição do Sistema

No concentrador a radiação solar é recolhida e enviada para o recetor. Ela é absorvida pelo recetor e aquece o fluído de trabalho do motor stirling, convertendo a radiação solar em energia mecânica. No gerador a energia mecânica é convertida em energia elétrica. Para ter um sistema mais eficiente, este possui um seguidor solar de dois eixos, controlado com o Arduino (Figura 26).

No sistema é instalado um conjunto de sensores para a leitura dos parâmetros ambientais (sensor temperatura, humidade) e sobre os dados de funcionamento do sistema (sensor temperatura no recetor, medidor velocidade do gerador).

Os dados são enviados para uma base de dados no Excel, permitindo ao operador verificar os dados de funcionamento do sistema.

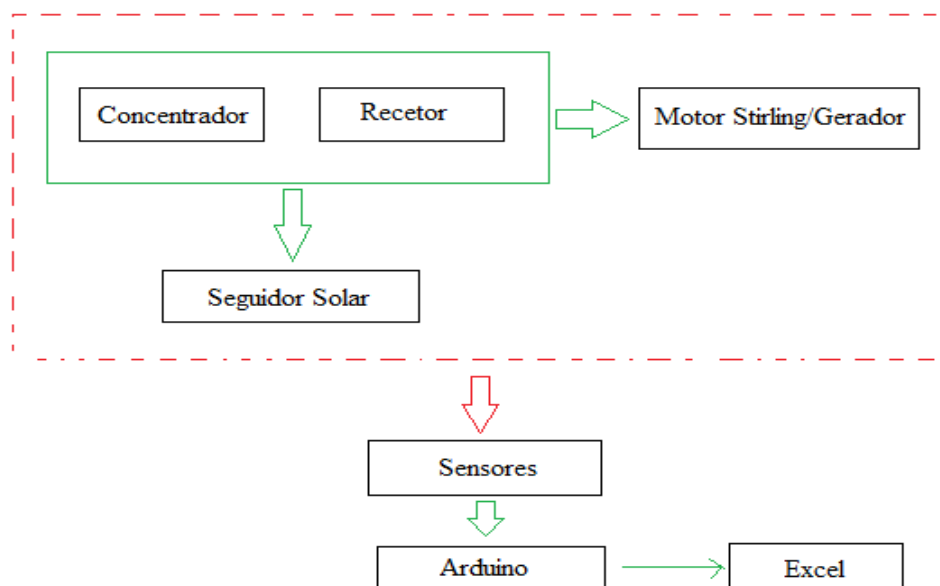


Figura 26: Descrição do sistema

Fonte: Própria

4.2 Concentrador

O prato parabólico foi o primeiro elemento a ser escolhido, tratando-se mais especificamente de uma elipse. As suas dimensões serão, portanto, consideradas como os dados de entrada do projeto. A partir da sua geometria e das suas dimensões será possível calcular o ponto focal e o diâmetro do recetor. A Tabela 3 indica os principais dados relativos a parábola.

Parábola	
Diâmetro maior (mm)	0,645
Diâmetro menor (mm)	0,605
Profundidade (mm)	0,045
Área (m ²)	0,3065
Material	Alumínio

Tabela 3: Dimensões da parábola

Fonte: Própria

Para a superfície refletiva do concentrador foi usado alumínio refletivo, um material forte e durável, com 0,2mm de espessura, sendo ideal para aplicar em sistema de concentradores solar. Este material possui alta taxa de reflexão, sendo que pode alcançar uma taxa máxima de reflexão da radiação solar de 90%.

4.3 Distância focal

Fazendo uma interação matemática com a Equação 5, podemos calcular a distância focal com base na seguinte expressão:

$$f = \frac{D_{con}^2}{16h} = \frac{(0,625)^2}{16 \times 0,045} = 0,5425m$$

A superfície de abertura é de forma elíptica, então para o D_{con} utilizou uma média entre o diâmetro menor e o maior.

Na Tabela 4 é apresentado as dimensões do concentrador.

Dimensões do concentrador	
Diâmetro (m)	0,625
Distância focal (m)	0,5425
Razão de abertura	1,15
Angulo borda (°)	33°
Refletividade (%)	90
Área (m ²)	0,3065

Tabela 4: Dados do concentrador

Fonte: Própria

4.4 Recetor

O diâmetro mínimo do recetor é calculado com base na Equação 7:

$$D_r = \frac{0,625 \times \sin(0,267)}{\sin(35,5) \times \cos(35,5 + 0,267)} = 0,6 \text{ cm}$$

Constata-se que a construção de um recetor térmico com um diâmetro tão pequeno é pouco viável. Com base nos resultados, optou-se por escolher um recetor com diâmetro de 3,5 cm, que permite intercepar a radiação solar em todos as direções. No recetor será aplicado uma pintura (cor preta), para garantir uma absortividade da radiação solar em 97%.

Para garantir uma distribuição uniforme da radiação solar sobre a superfície do recetor, é necessário deslocar o recetor do ponto focal.

$$D_f = (0,5425 - 0,045) \times \frac{0,02}{0,625} = 0,0239m$$

$$C_h = 0,5425 - 0,0239 = 0,5186 \text{ m}$$

A Figura 27 indica as principais dimensões do protótipo.

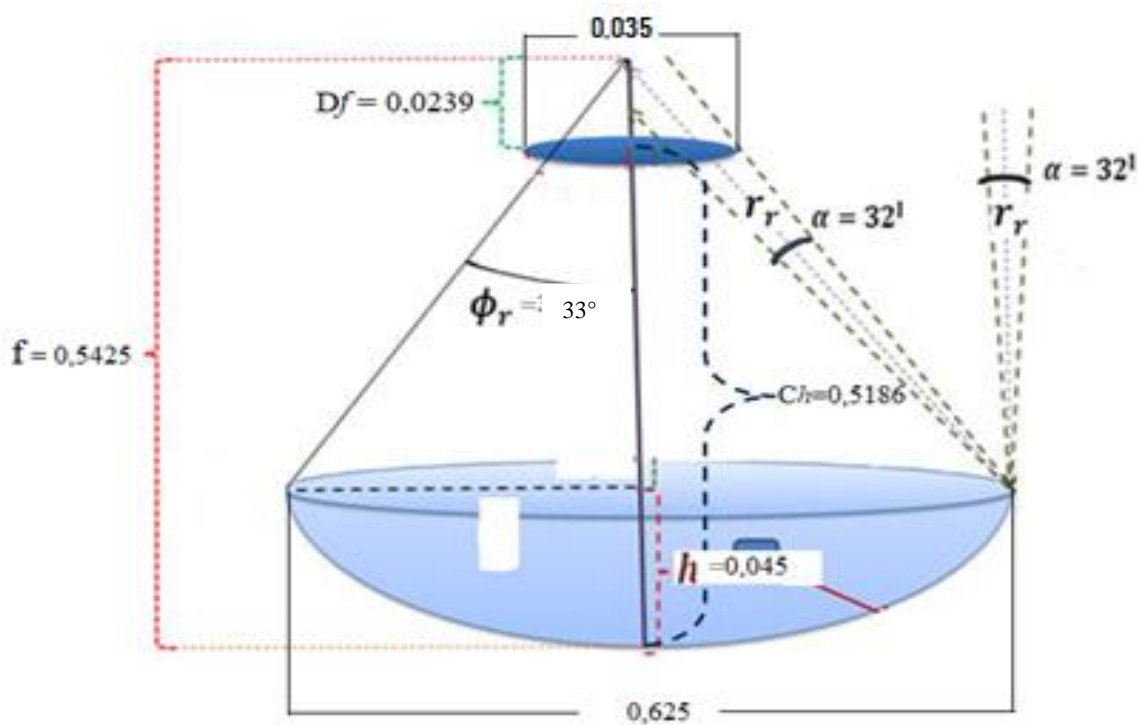


Figura 27: Representação das dimensões do concentrador

Fonte: Própria

4.5 Seguidor Solar

Neste projeto optou por projetar um seguidor solar de 2 eixos do tipo azimute/ elevação, um sistema de baixo custo, fácil construção que apenas necessita dos dados recebidos pelos sensores para efetuar o posicionamento do sistema. Assim sendo foi desenvolvido mecanismos de movimentação tanto para o eixo horizontal, como para o eixo superior da parábola.

No caso da elevação, o mecanismo mais viável, e que garante maior precisão no posicionamento é o atuador linear constituído por um conjunto motor/redutor cujo eixo é acoplado a um fuso. Por ser um projeto de pequena dimensão optou por utilizar um servomotor.

Numa primeira fase para a confecção do seguidor fez alguns esboços do sistema e em seguida o desenho do mesmo no software SolidWorks, Figura 28.

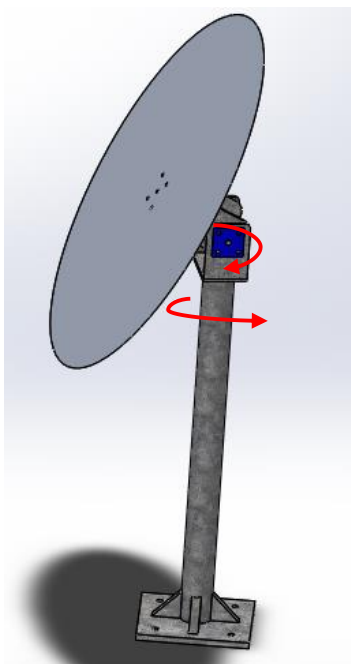


Figura 28: Desenho do protótipo no software SolidsWorks

Fonte: Própria

4.5.1 Configuração dos sensores LDR

Para o seguidor solar foi projetado um sistema baseado no princípio de balanceamento de sombra gerado por uma pala. O Arduino utiliza a comparação dos valores de tensão nos dois LDR, que de acordo com a posição do sol, ficam totalmente ou parcialmente iluminados/sombreados graças à presença desse elemento de sombra.

Este sombreamento é fundamental para uma orientação correta do sistema, evitando a captação da radiação solar que não advém da incidência direta dos raios solares (Figura 29). O material usado para causar este efeito de sombra tem que ser pintado com uma cor escura, para que não haja a reflexão da radiação solar, dificultando assim a sensibilidade dos valores dos LDR.

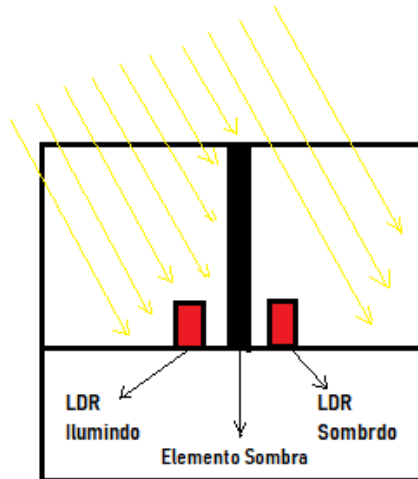


Figura 29: Sistema de balanceamento de sombra nos LDR

Fonte: Própria

Com base na Figura 30, calcula-se um valor para cada lado da pala, correspondente a média aritmética dos valores lidos do conjunto dos dois sensores. Assim, o valor do lado direito (VD) corresponde a média dos valores do sensor LDR₂ e LDR₁, o valor do lado esquerdo (VE) corresponde a média dos sensores LDR₃ e LDR₄ e aplica-se o mesmo princípio para o valor superior (VS) e para o valor inferior (VI).

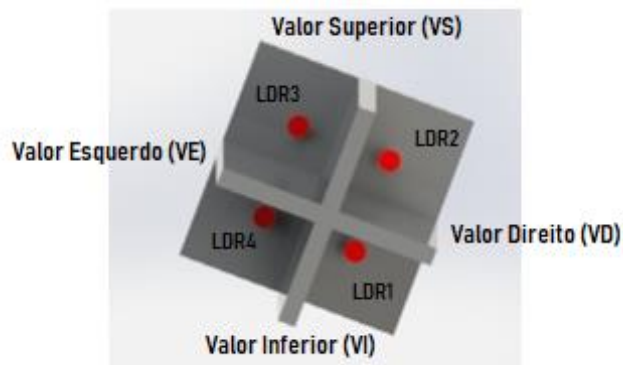


Figura 30: Montagens dos 4 LDR com as palas de sombreamento

Fonte: Própria

Devido ao movimento do Sol e da posição do concentrador solar, a sombra criada pela pala que separa os sensores é diferente ao longo do tempo e consequentemente os valores

calculados também o são. Pela variação do azimuth solar, há instantes em que o valor do lado direito é maior, porque a luminosidade é mais intensa desse lado e há instantes em que é menor, pela razão oposta.

Para a leitura dos sensores LDR foi implementado divisores de tensão, onde as saídas dos mesmos são ligadas às entradas analógicas do Arduino. Se forem detetadas diferenças, os motores são acionados num determinado sentido, se não houver diferença entre os sinais à saída dos divisores de tensão, então o sistema está direcionado para o sol (Figura 31).

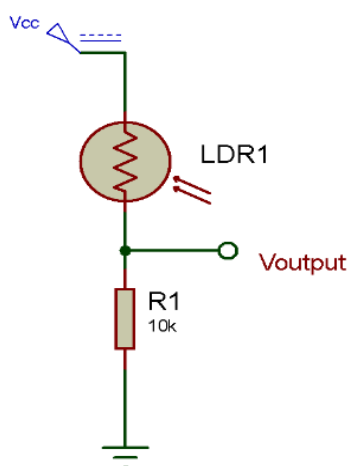


Figura 31: Circuito do divisor de tensão aplicado nos LDR

Fonte: Própria

Pela aplicação de uma tensão na entrada do circuito, obtêm-se uma tensão à saída dependente da intensidade da luz. Esta tensão é utilizada como uma variável de entrada analógica no Arduino, com um sinal variável entre 0 e 1023, dado que as portas analógicas do Arduino comunicam a 10 bits.

4.5.2 Algoritmo do sistema de controlo

A Figura 32 representa o procedimento realizado para o seguimento azimutal. Por meio da equação do tempo de duração do dia, é feita o cálculo da hora do nascer e pôr-do-sol, para assim definir a hora de funcionamento do sistema. Quando a hora estiver fora deste intervalo, os servomotores devem movimentar-se na posição do nascer do sol.

O Arduíno ao ler o valor de cada sensor, calcula os valores correspondentes de cada lado, precedendo depois a comparação dos valores. Se os valores forem iguais, significa que nenhum dos sensores apresenta qualquer sombra, ou seja, que o concentrador encontra-se corretamente posicionados, não sendo necessário corrigir o posicionamento da estrutura. Se por outro lado, o valor do lado esquerdo for maior, existe uma sombra do lado direito, logo é necessário que se mova a estrutura até que os valores voltem a ser iguais.

O procedimento para o ajuste da elevação é semelhante ao processo de ajuste horizontal, mas a atuação dá-se pelo motor responsável pelo movimento de elevação da estrutura e os dois valores a considerar são os valores da parte superior e da parte inferior.

Para o caso de um dia de nebulosidade, o comportamento do seguidor será diferente dado que os níveis de radiação são diferentes e os sinais dados pelos sensores sofrem grandes variações. Para um dia com estas características, o seguidor irá sempre procurar a zona mais clara do céu, caso o disco solar esteja obstruído pelas nuvens.

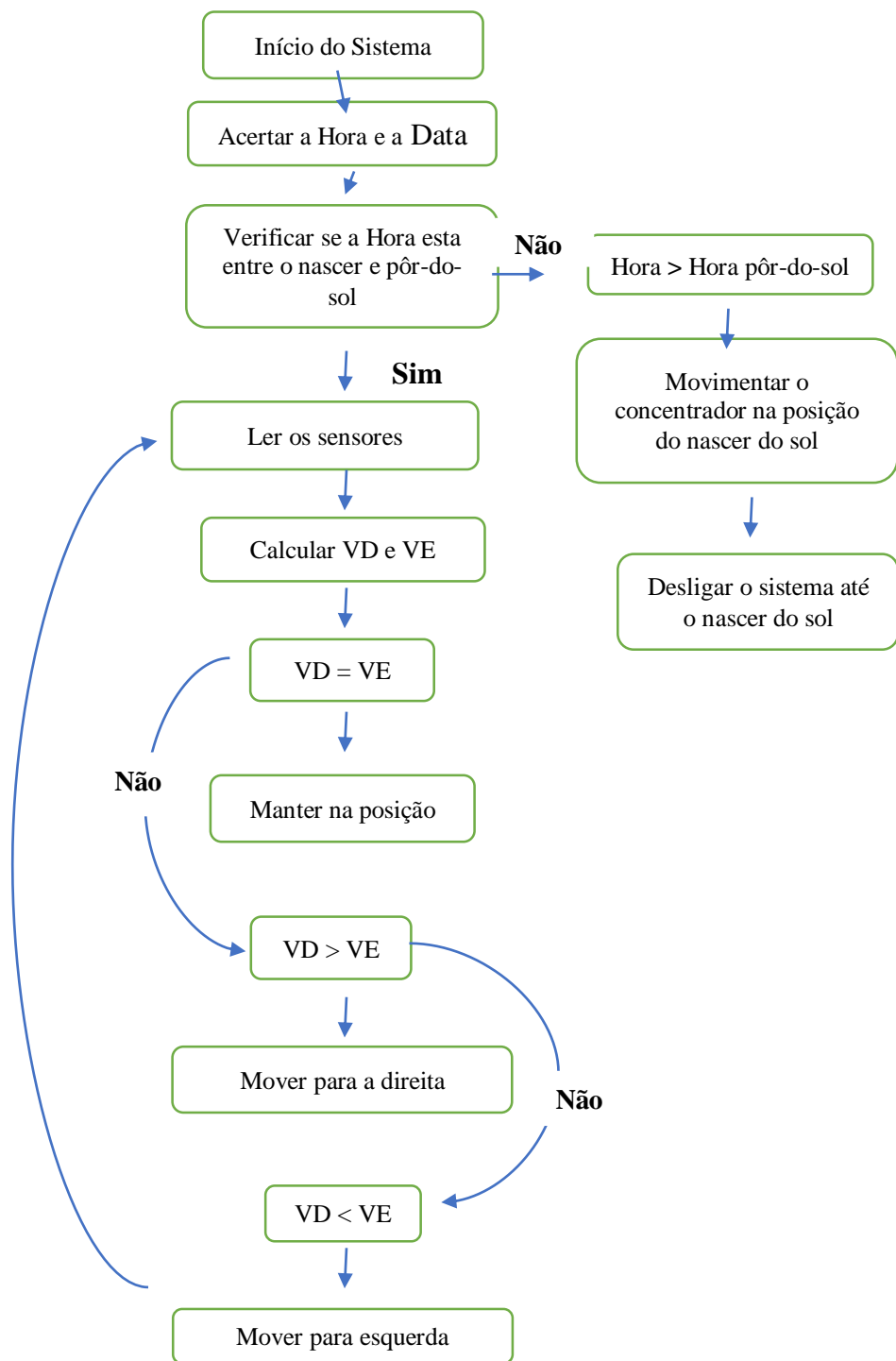


Figura 32: Algoritmo do sistema controle do seguidor solar

Fonte: Própria

4.5.3 Seleção dos atuadores

Os motores aplicados no seguidor solar devem permitir a inclinação do prato parabólico, e a sua movimentação segundo o ângulo de azimuth. A escolha dos motores foi bastante simples, uma vez que estes motores são dimensionados em função da dimensão do prato parabólico. Por ser um protótipo de pequenas dimensões escolheu-se dois servomotores que apresentam as seguintes especificações:

- Engrenagens de alumínio de alta precisão
- Marca: JX
- Serie: PDI-6221MG 20KG
- Frequência de trabalho: 1520 μ s / 330hz
- Torque (4.8V): 1,69 N.m
- Torque (6V): 1,99 N.m
- Dimensões: 40.5 X 20.2 X 38mm
- Peso: 62 g
- Comprimento do fio do conector: JR 265 mm



Figura 33: Servo motor

Fonte: www.banggood.com

4.5.4 Implementação do sistema de controlo

O esquema da Figura 34 representa o circuito de controlo do seguidor, e é constituído por:

- 1 Arduíno;
- 2 Servomotores;

- 1 Módulo de relógio;
- 4 LDRs;
- 4 Resistências de 10 k Ω ;
- 1 Relé.

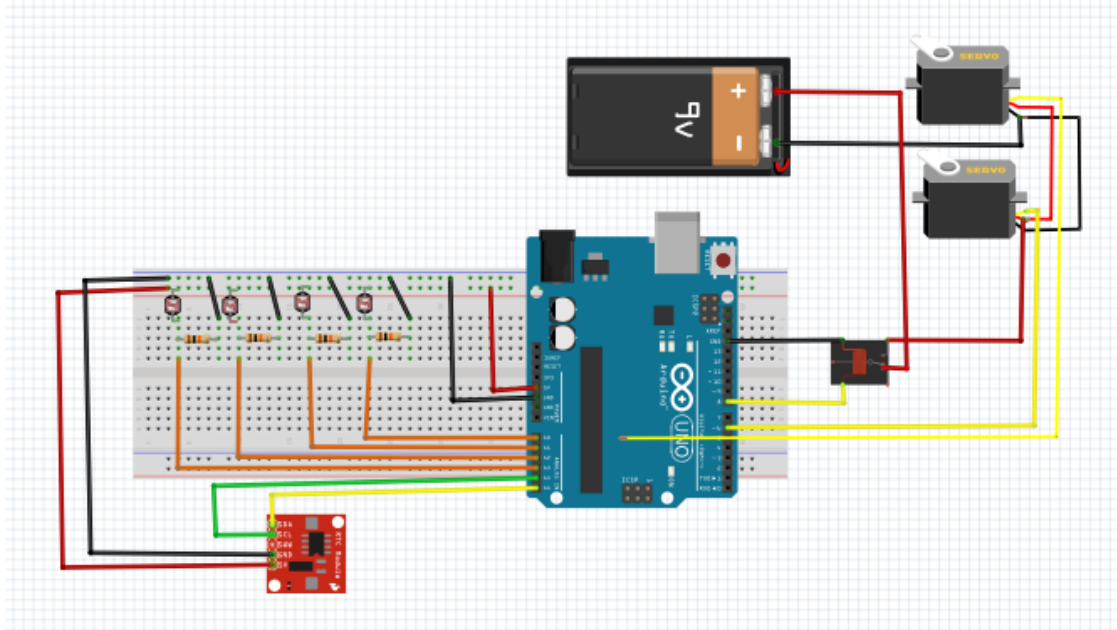


Figura 34: Circuito do seguidor solar

Fonte: Própria

O Arduino é responsável pela leitura dos quatros sensores LDR, quando detetar uma diferença entre os valores lidos, os servomotores são acionados. Estes são acionados em função da hora de funcionamento, definida pelo módulo relógio⁴.

4.6 Motor Stirling

Neste trabalho utilizou um modelo de um motor stirling didático, com dois pistões posicionados horizontalmente, volante de inercia fabricado em aço inoxidável, cilindro de

⁴ Em uma hora o sol avança 15°, os servos motores são acionados em cada hora para movimentaram 15° na direção do sol.

liga de alumínio e tem um regenerador. Seu sistema de resfriamento é por convecção natural, e tem como gás de trabalho o ar (Figura 35).



Figura 35: Motor stirling

Fonte: www.banggood.com

Principais características do motor stirling:

Material: O motor é fabricado em aço inoxidável, liga de alumínio e vidro;

Dimensões: L * W * H (155 x 80 x 85) mm; diâmetro do volante de 50mm; diâmetro do cilindro de alimentação 12,5mm; curso do pistão 15mm;

Velocidade: 3000 rpm.

4.7 Análise Estrutural do Sistema

Relativamente ao dimensionamento estrutural do sistema procedeu-se aos cálculos das forças que atuam sobre o mesmo e de seguida efetuar as simulações em SolidWorks.

4.7.1 Base suporte do concentrador

Tendo em conta as dimensões do concentrador e do conjunto motor/gerador, optou-se por projetar as duas peças com uma espessura de 3 mm. O material utilizado para o fabrico das

peças é o aço galvanizado, sendo que este apresenta as seguintes propriedades mecânicas apresentada na Tabela 5. A Figura 36 mostra o desenho do suporte do concentrador no software SolidWorks.

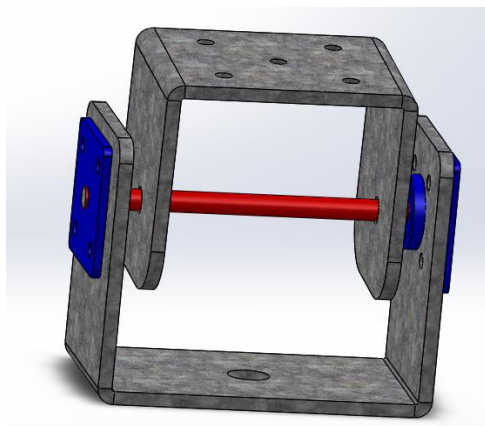


Figura 36: Base suporte do concentrador

Fonte: Própria

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade	200000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0,29	N/A
Massa específica	7870	Kg/m ³
Resistência Tração	356,9	MPa
Tensão Cedência	203,94	MPa

Tabela 5: Propriedades mecânicas do aço galvanizado

Fonte: SolidWorks

As forças que atuam sobre a estrutura são o peso e a força aerodinâmica, sendo esta última fundamental, uma vez que o vento é um dos principais fatores de risco no projeto de seguidores solares.

A massa do concentrador e motor stirling é de 2,2 Kg, logo o sistema irá suportar um peso de 21,56 N.

A força aerodinâmica é capaz de contrariar o movimento dos motores do seguidor solar, provocando um momento contrário ao binário exercido. Esta força atua sobre o disco parabólico em diversas direções. Porém, a situação crítica é tal como apresentado Figura 37. Esta situação ocorre quando o concentrador está orientado numa posição que coincide com a direção do vento. O vento colidirá sobre toda a área do concentrador, permitindo que o vetor da força aerodinâmica atue no sistema.

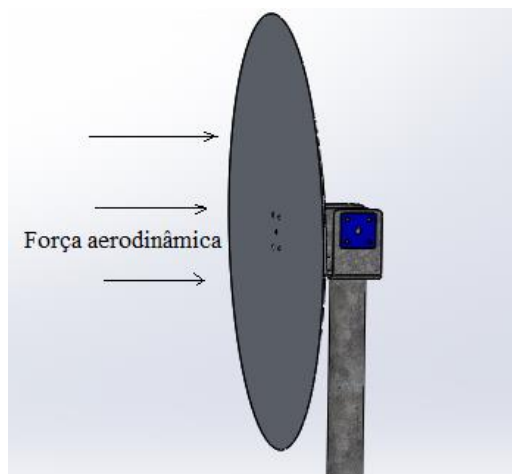


Figura 37: Força aerodinâmica atuante sobre o sistema

Fonte: Própria

A força aerodinâmica que atua sobre o sistema é calculado com a Equação 28, em que $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (densidade do ar), V (velocidade do vento), C_D (coeficiente aerodinâmico do disco parabólico) e A (área).

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (28)$$

O sistema será dimensionado para suportar uma velocidade máxima de 25 m/s. Sabendo que a área do concentrador é de $0,3065 \text{ m}^2$, é possível calcular C_D , tendo por base a informação fornecida pelo Anexo 6. Sabendo que $I = 645 \text{ mm}$ e $D = 605 \text{ mm}$, e tendo em conta que o fluxo é normal à superfície, logo $C_D \approx 0,96$.

Substituindo os dados na equação da força aerodinâmica obteve um valor de 112,6 N.

$$F = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 0,3065 \times (25)^2 \times 0,96 = 112,6 \text{ N}$$

A força aerodinâmica gera um momento, resultado do produto entre a força e o braço (b). O braço corresponde à distância entre o ponto de aplicação da força (concentrador) e o ponto de rotação do sistema, Figura 38.

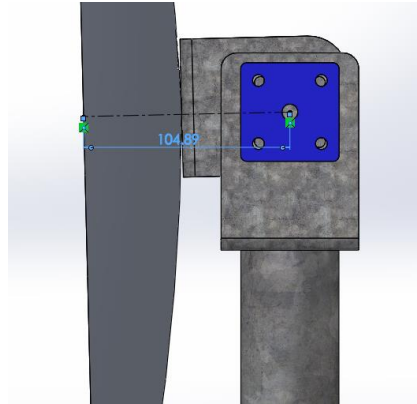


Figura 38: Distância entre o ponto de aplicação da força (concentrador) e o ponto de rotação do sistema

Fonte: Própria

$$M = 72,09 \times 104,89 = 11\,260,2 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

4.7.2 Veio

O veio efetua a ligação entre a peça da base do concentrador e a base do seguidor solar, e tem como função permitir a inclinação do prato parabólico, sendo um componente de extrema importância para o bom funcionamento do seguidor.

Como forma de reduzir o atrito e consequentemente as forças de torção nas duas extremidades onde é efetuada a união da base de suporte e a peça de fixação do concentrador, empregou-se dois rolamentos.

Tendo em conta a sua função, constata-se que o veio irá sofrer flexão devido às forças exercidas durante a etapa de funcionamento. Sabendo que a força atuante é de 28 N

(resultante do somatório do peso do prato parabólico, do recetor e da estrutura de fixação) e que o comprimento do veio é de 130 mm, é possível calcular o momento causado pela força aerodinâmica (72,09 N). O momento é 9371,7 N.mm.

O veio será fabricado com o mesmo material da estrutura do concentrador. Aplicando um coeficiente de segurança (CS) de 1,5, obtém uma tensão admissível de 135,96 N/mm².

$$\sigma_{admissivel} = \frac{\sigma_{cedência}}{cs} = \frac{203.94}{1,5} = 135,96 \text{ N/mm}^2$$

No caso de uma flexão temos:

$$\sigma_{admissivel} \geq \frac{M}{W}$$

$$W \geq \frac{9371,7}{135,96}$$

$$W \geq 68,93 \text{ mm}^3$$

Em que W é dado pela seguinte Equação 29:

$$W = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \quad (29)$$

Logo o diâmetro mínimo do veio é de 8,8 mm.

No software SolidWorks efetuou dois testes, um Von Mises e outro de Deslocamento referente a análise estática, para verificar se o veio irá entrar em colapso quando aplicada uma força de 72,09 N, cujos resultados obtidos são apresentados nas Figura 39 e 40 respetivamente.

No teste efetuado de Von Mises da Figura 39 obteve um limite máximo de escoamento de 198652 N/m², que está muito abaixo do limite máximo de escoamento da peça. Essas tensões críticas aparecem nas duas extremidades do veio.

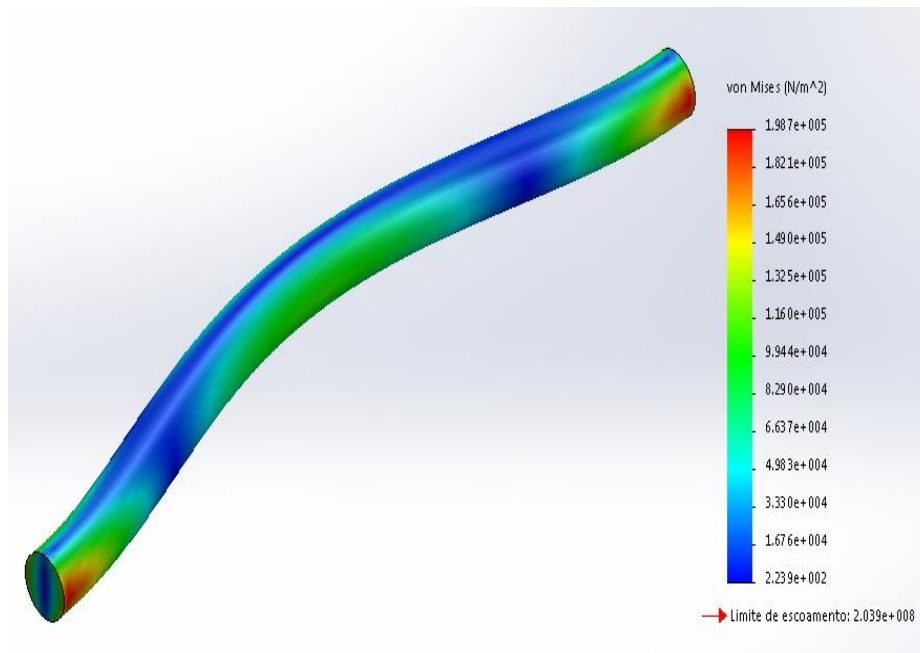


Figura 39: Resultado do Teste de von mises do veio em SolidWorks

Fonte: Própria

No teste de deslocamento (Figura 40) obteve-se um valor máximo é de 0,000145848 mm e ocorre no centro do veio. Como se pode observar, este valor não tem influência relevante no sistema. Portanto conclui-se que o veio foi bem dimensionado.

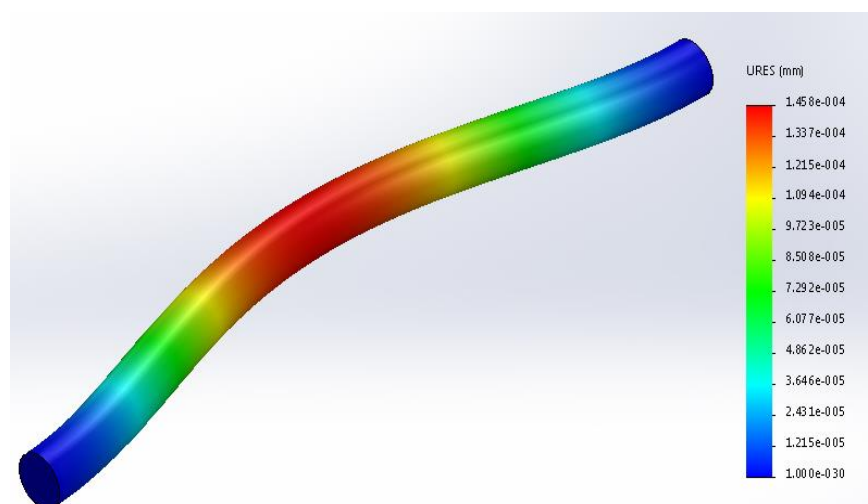


Figura 40: Resultado do teste deslocamento do veio em SolidWorks

Fonte: Própria

4.7.3 Torre

Considerando as massas abordadas anteriormente, a torre deve suportar um peso de 55,9 N. A tensão exercida sobre a torre é de compressão, visto que é fixo no solo. Esta tensão é calculada pela Equação 30:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (30)$$

Tendo em conta as propriedades mecânicas do aço galvanizado, é possível determinar a área mínima da torre.

$$A \geq \frac{55,9}{135,96} = 0,411 \text{ mm}^2$$

Pode verificar que pelo resultado obtido, um tubo com um diâmetro muito reduzido consegue suportar a força de compressão, resultante do peso dos componentes.

Considerando a força aerodinâmica gerada pelo sistema:

$$W \geq \frac{11\,260,2}{135,96} = 82,8 \text{ mm}^3$$

Com base nos dados acima foi selecionado um tubo com diâmetro externo de 50 mm e com uma espessura de 3 mm.

Tal como referido anteriormente, a força aerodinâmica provocada pela velocidade do vento é a que tem maior valor influência sobre o sistema. Uma vez que o material constituinte do tubo possui uma tensão de cedência de 203,9 MPa, é importante garantir que quando ocorrer a situação crítica, as tensões resultantes não ultrapassem esse valor.

Na simulação de Von Mises, as tensões atuantes sobre a torre não ultrapassam os 7,562 MPa. Desta análise conclui-se que a base da torre é a zona mais afetada, porém, verifica-se que este foi bem dimensionado e que resiste perfeitamente às tensões atuantes (Figura 41).

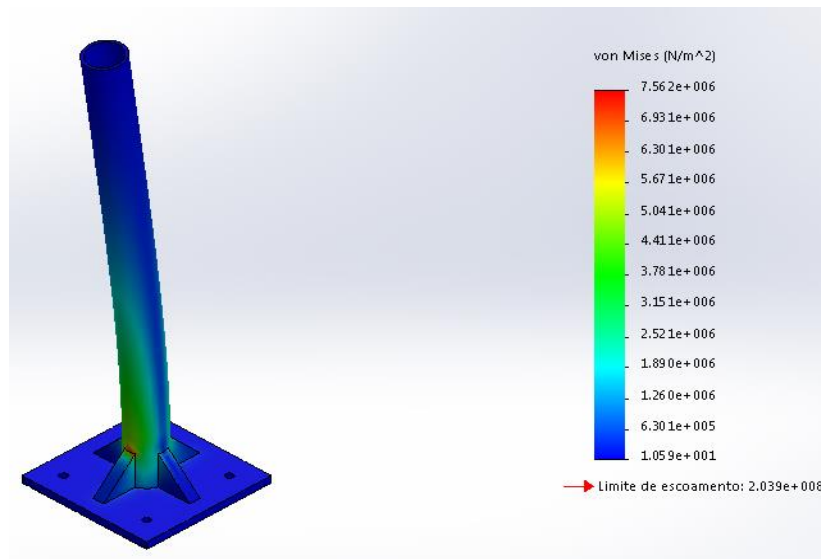


Figura 41: Resultado do Teste de von mises da torre em SolidsWorks

Fonte: Própria

Analisando o deslocamento da torre verifica-se que o ponto crítico encontra-se na zona onde atua a força aerodinâmica, registrando-se um deslocamento máximo de 0,0961313 mm (Figura 42).

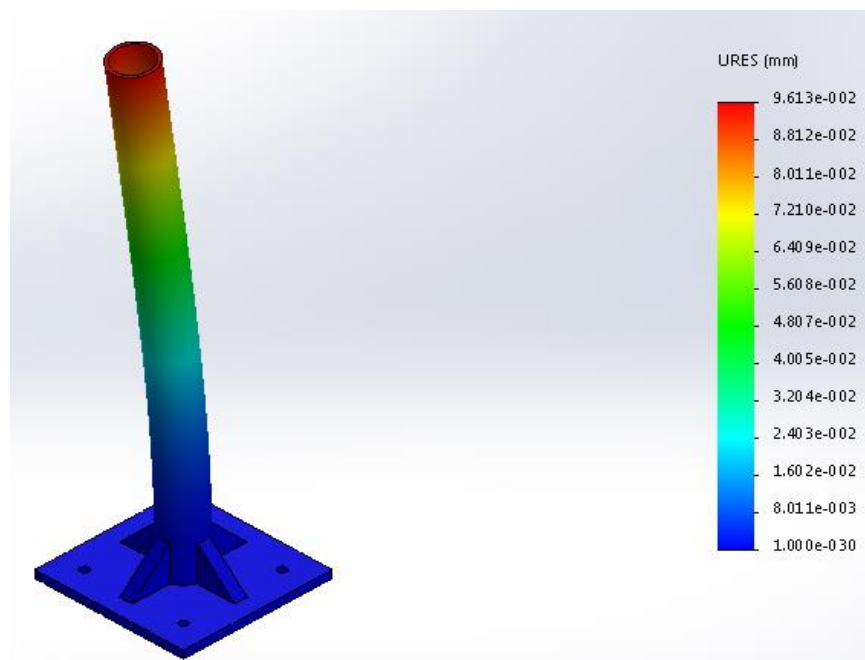


Figura 42: Resultado do teste deslocamento da torre em SolidsWorks

Fonte: Própria

4.8 Balanço Energético Do Sistema

O objetivo de realizar o balanço energético do sistema é de calcular a energia produzida, em função da radiação solar disponível e da área do sistema.

Com base nos dados da radiação solar no Mindelo, retirado do software RETScreen (Anexo 2), obtive o seguinte gráfico da distribuição da radiação solar ao longo do dia para cada mês do ano no concentrador, tendo uma media de 1,85 kWh/m²/dia.

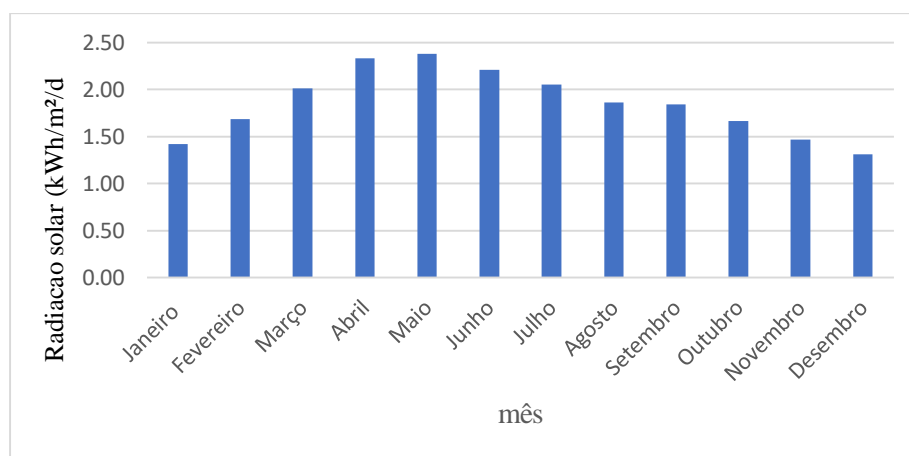


Gráfico 4: Radiação solar incidente no concentrador

Fonte: Própria

4.8.1 Rendimento ótico

Para quantificar o desempenho do sistema é necessário calcular a eficiência ótica, definida como a relação entre a radiação que intercepta a superfície do absorvedor e a radiação incidente sobre a área de abertura.

Para efetuar o cálculo do mesmo é preciso conhecer os materiais utilizados na fabricação do recetor. No recetor é aplicado uma pintura de cor preta, que apresenta uma absorvidade e emissividade de 0,97, ângulo de sombreamento de 5°. Por não ter dados suficiente para calcular o fator de dispersão, considerou um valor de erro dispersão de 3% (valor típico encontrados nos sistemas disco stirling em operação).

Para calcular a eficiência ótica utilizou a Equação 10, tendo obtido um valor de 70,3%

$$f_s \cdot \gamma = \frac{\sin^2 \Phi_r - \sin^2 \Phi_{min}}{4 \tan^2 \left(\frac{\Phi_r}{2} \right)} = \frac{\sin^2(32) - \sin^2(5)}{4 \tan^2 \left(\frac{32}{2} \right)} = 0,83$$

$$\varphi_{otico} = f_s \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot F$$

$$\varphi_{otico} = 0,83 \times 0,9 \times 0,97 \times 0,97 = 70,3\%.$$

4.8.2 Calor ótico

Para calcular o calor ótico, foi considerada a radiação média diária no concentrador em cada mês do ano, tendo obtido os seguintes dados na Tabela 6.

Mês	Radiação Solar (w/m2/dia)	Q _s	Q _{ótico}
Janeiro	4630	1419	998
Fevereiro	5490	1683	1183
Março	6570	2014	1416
Abril	7610	2332	1640
Maio	7760	2378	1672
Junho	7220	2213	1556
Julho	6700	2054	1444
Agosto	6080	1864	1310
Setembro	6020	1845	1297
Outubro	5430	1664	1170
Novembro	4780	1465	1030
Dezembro	4270	1309	920

Tabela 6: Calor ótico medio diário no recetor em cada mês do ano:

Fonte: Própria

O calor absorvido pelo recetor é máximo no mês de Junho 1672 W e mínimo no mês de Dezembro 920 W.

4.8.3 Temperatura teórica no recetor

Para calcular a temperatura teórica no recetor usou a Equação 12. Para quantificar a temperatura no recetor em cada hora, utilizou dados da radiação solar no Mindelo para o dia 3 de Março, como mostra o Gráfico 5.

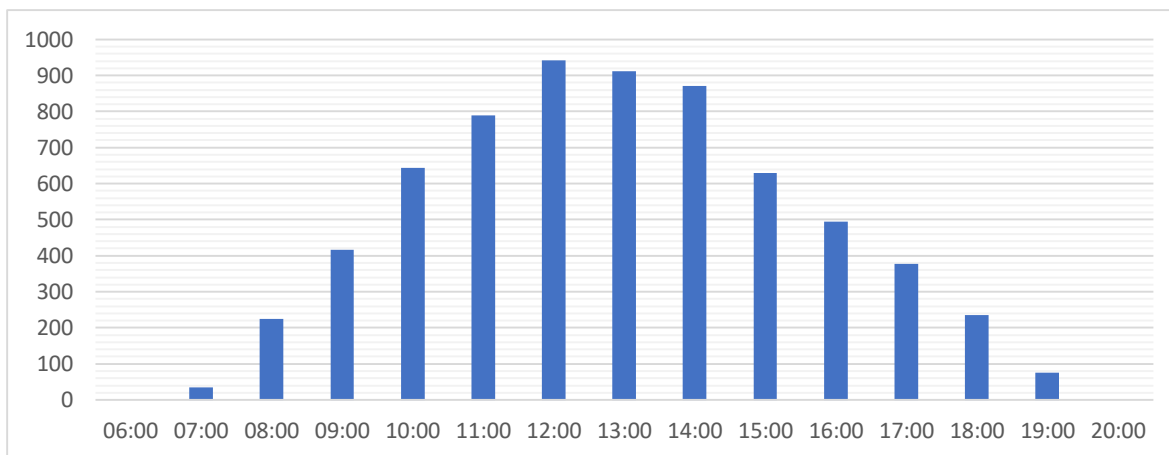


Gráfico 5: Radiação solar incidente no dia 3 Março de 2019

Fonte: Meteoblue, 2019

A Tabela 7 mostra a variação da temperatura em função da radiação solar incidente.

Horas	Radiação solar (W/m ²)	Q _s (W)	Q _{ótico} (W)	T _{recetor} (°k)
06:00	0	0	0	0
07:00	35	11	7,5	457
08:00	225	69	48,5	728
09:00	416	128	89,6	849
10:00	644	197	138,8	947
11:00	789	242	170	996
12:00	942	289	203	1042
13:00	912	280	196,5	1033
14:00	870	267	187,5	1021
15:00	630	193	135,7	942
16:00	495	152	106,7	887
17:00	378	116	81,4	829
18:00	236	72	50,9	737
19:00	75	23	16,2	553

Tabela 7: Temperatura teórica no recetor desde o nascer até o pôr-do-sol

Fonte: Própria

4.8.4 Perdas de calor por radiação

Para calcular as perdas de calor por radiação foi aplicada a Equação 18, sendo considerado a emissividade de 0,97. Na Tabela 8 podemos visualizar as perdas de calor por radiação.

Horas	T_{recetor} (°K)	Q_{radiação} (W)
07:00	457	1,90
08:00	728	14,46
09:00	849	27,09
10:00	947	42,17
11:00	996	51,75
12:00	1042	61,87
13:00	1033	59,89
14:00	1021	57,11
15:00	942	41,24
16:00	887	32,31
17:00	829	24,58
18:00	737	15,19
19:00	553	4,54

Tabela 8: Perdas calor por radiação em função da temperatura teórica

Fonte: Própria

4.8.5 Perdas de calor por convecção

As perdas por convecção são originadas pelo vento incidente na superfície do recetor. No cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção considerou a velocidade média do vento de 6 m/s.

O coeficiente de transferência de calor por convecção é 20,8 W/m²°K. Na Tabela 9 é possível visualizar as perdas calor por convecção desde o nascer até o pôr-do-sol.

Horas	Q convenção (W)
07:00	3,19
08:00	8,61
09:00	11,03
10:00	12,99
11:00	13,98
12:00	14,88
13:00	14,71
14:00	14,47
15:00	12,89
16:00	11,78
17:00	10,63
18:00	8,78
19:00	5,11

Tabela 9: Perdas por convecção

Fonte: Propriá

4.8.6 Perdas globais e calor útil

Procedendo à análise do Gráfico 6 sobre a variação do calor útil ao longo do dia, verifica-se que este valor é mais expressivo entre as 09:00 e 16:00, uma vez que a radiação solar é mais intensa. As perdas globais do sistema tem valores expressivos, porque o sistema irá trabalhar a temperaturas muito elevadas.

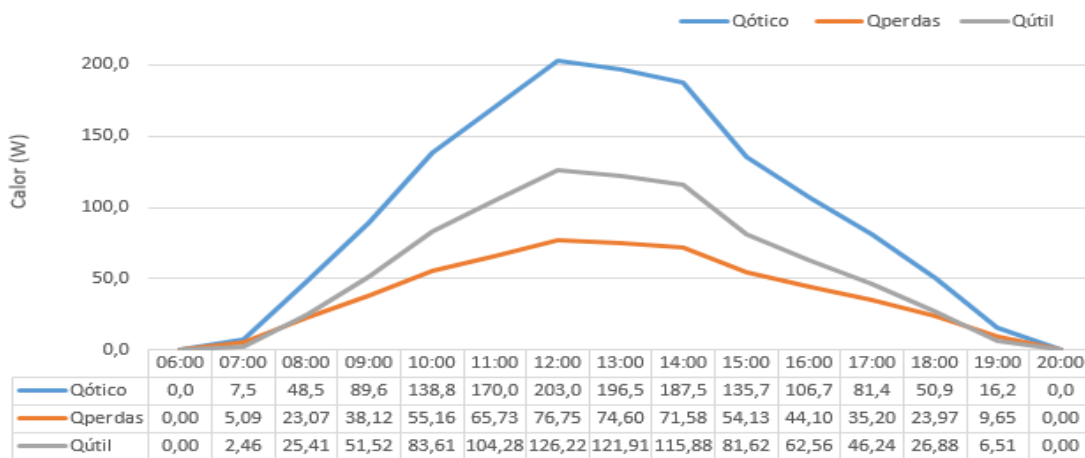


Gráfico 6: Variação do calor útil e das perdas no recetor desde o nascer ao pôr-do-sol no dia 3 Maio

Fonte: Própria.

4.8.7 Eficiência do concentrador, do recetor e potência elétrica

A eficiência térmica do recetor caracteriza a energia útil que o recetor consegue transferir para o fluido trabalho do motor. Por outro lado, a eficiência do concentrador permite avaliar a capacidade do concentrador refletir a radiação solar para o recetor.

A eficiência máxima do concentrador é de 43,7 %, apresenta um valor baixo, porque o material utilizado tem uma refletividade de 90 % e do sombreamento causado pelo recetor ao longo da superfície do concentrador. O rendimento máximo do recetor é de 62,2%, atingido ao meio dia (Gráfico7).

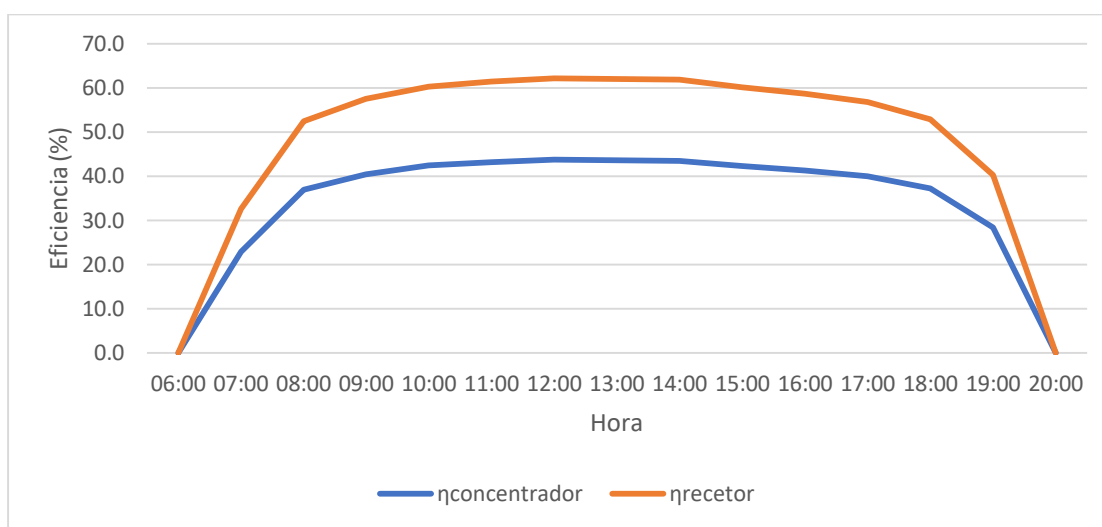


Gráfico 7: Eficiência do concentrador e do recetor

Fonte: própria

Sendo que o motor stiling apresenta um rendimento de 72% e o gerador de 95%, é possível calcular a eficiência global do sistema, que irá permitir calcular a potência elétrica, tendo obtido um valor teórico de 48,5 W.

$$\eta_{Total} = 0,437 \times 0,622 \times 0,72 \times 0,95 = 0,186$$

$$P_{SE} = 0,186 \times 850 \times 0,3065 = 48,5 \text{ W}$$

$$E_{Anual} = 48,5 \text{ W} \times 3750 \text{ h} = 181875 \text{ Wh}$$

4.9 Instrumentação E Sistema Controle

A parte fundamental de um trabalho experimental é medir as diversas variáveis físicas do protótipo em operação de forma a avaliar o seu funcionamento. A instrumentação do sistema consiste num conjunto de sensores, tais como temperatura, humidade e medidor de velocidade.

Com sensores devidamente posicionados e sincronizados entre si, obtém-se todos os dados de operação, através de um sistema de aquisição de dados.

Os dados dos sensores são lidos pelo Arduino e são enviados para uma página em Excel por meio do software PLX-DAQ.

O PLX-DAQ é uma ferramenta complementar de aquisição de dados de microcontroladores Parallax para Microsoft Excel. Qualquer microcontrolador conectado a qualquer sensor e a porta serial de um computador, os dados são enviados para o Excel.

4.9.1 Instalação do software PLX-DAQ

Depois de baixar o software, a instalação do PLX DAQ resume em apertar next em toda a instalação.

Depois da instalação, é criada uma pasta chamada PLX-DAQ. Dentro da pasta iremos encontrar o ficheiro Excel (PLX-DAQ Spreadsheet), que será usada para a leitura dos sensores.

A segurança do seu PC desabilitará os macros no Excel. Será preciso habilitar esta ferramenta. Para habilitar esta ferramenta é só clicar em opções no aviso de segurança conforme mostra as Figuras 43 e 44.

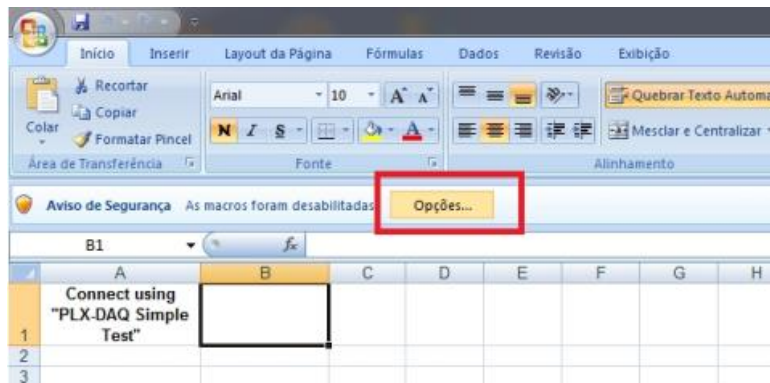


Figura 43: Menu opções do aviso de segurança

Fonte: Própria

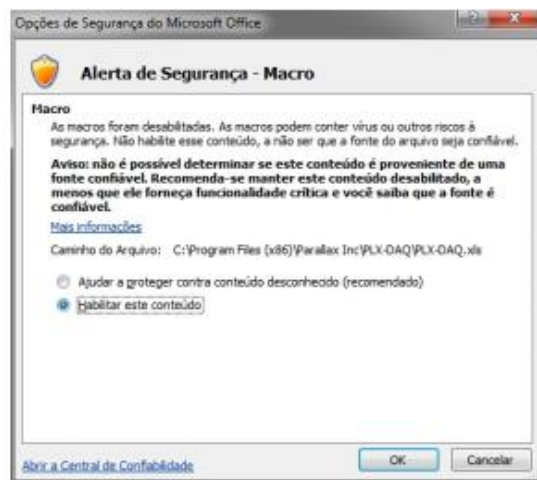


Figura 44: Janela para habilitar os macros

Fonte: Própria

O programa abrirá. De seguida deve seleccionar a porta em que o Arduíno está conectado (e clique em connect).

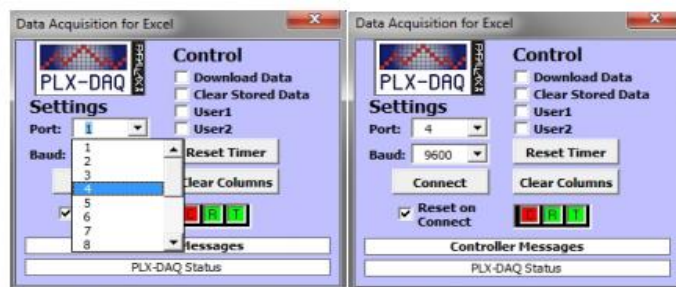


Figura 45: Interface de comunicação com Arduíno e PLX-DAQ

Fonte: Própria.

4.9.2 Esquema de ligação dos sensores no Arduino

4.9.2.1 Sensor DHT22

Para medição das variáveis humidade e temperatura ambiente, foi escolhido o sensor DHT22. O DHT22 é um sensor de temperatura e humidade que permite fazer as leituras de temperaturas entre -40 a +80 °C (graus Celsius) e humidade entre 0 a 100%. O circuito da Figura 46 mostra a interligação do sensor DHT22 com o Arduino. O sensor é ligado no pino digital 7 do Arduino.

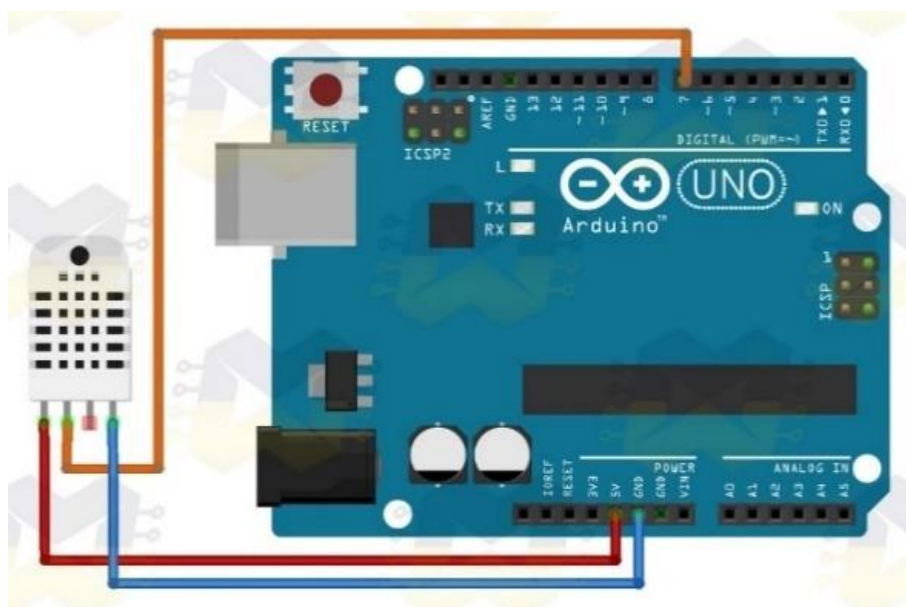


Figura 46: Interligação do sensor DHT22 com arruíno

Fonte: Própria

4.9.1.2 Termopar tipo k

Para medir a temperatura no recetor, foi utilizado um termopar do tipo K. Este termopar é ligado a um módulo digital (MAX 6675⁵), cuja função é obter a temperatura do termopar e transformar em um sinal analógico (entre 0 e 5 V) para posterior leitura no Arduino.

⁵ Este módulo tem a função de amplificar o sinal de tensão gerado pela nas junções “quente” e “fria” do termopar e, simultaneamente, atuar na compensação da temperatura da “ponta-fria” do sensor, simplificando o processo de aquisição dos sinais gerados.

O circuito integrado MAX6675 que faz o papel de intermediador, realizando o contato entre um Arduino e um termopar de maneira fácil. Este chip mede a saída de um termopar tipo K e entrega o resultado para o Arduino através da interface SPI⁶ (Serial Peripheral Interface).

O circuito da Figura 47 mostra a ligação do sensor termopar com o Arduino.

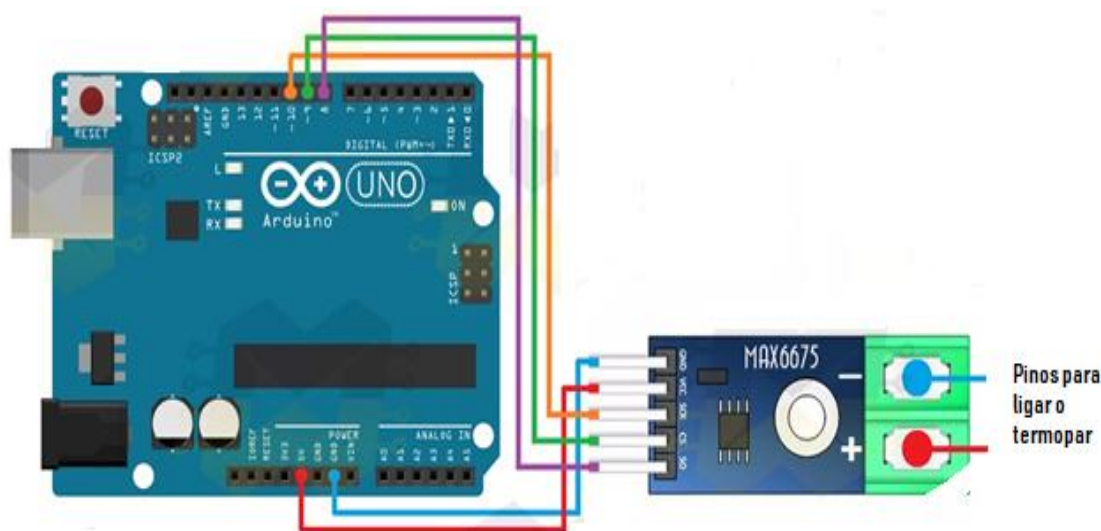


Figura 47: Interligação do sensor termopar tipo K com Arduino

Fonte: Própria

4.9.2.3 Sensor de Velocidade

O Sensor de Velocidade Encoder é utilizado para medir a rotação do gerador. Pode ser utilizado com os mais diversos controladores e placas, como por exemplo o Arduino e o Raspberry Pi.

É indicado para utilização com um disco encoder, onde as ranhuras do disco irão interromper o feixe de luz infravermelho e enviar um sinal ao microcontrolador. A Figura 48 mostra a ligação do sensor com Arduino.

⁶ SPI é um protocolo de dados seriais síncronos usado por microcontroladores para comunicação rápida com um ou mais dispositivos periféricos em distâncias curtas. Também pode ser usado para comunicação entre dois microcontroladores.

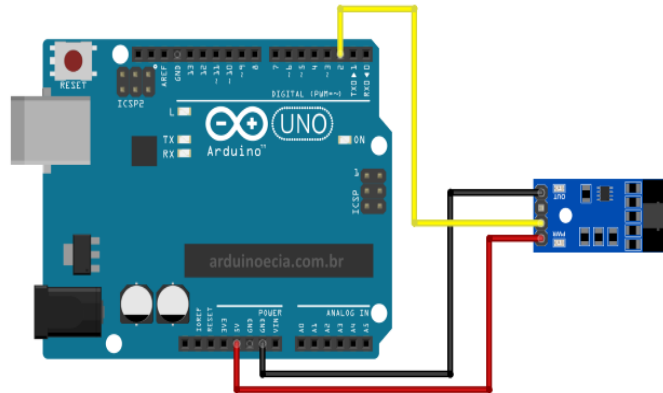


Figura 48: Ligação do sensor velocidade encorder com Arduíno

Fonte: Própria

4.10 Custo Do Protótipo

Na Tabela 10 encontra-se especificado o custo total do protótipo.

Equipamento	Custo (ECV)
Concentrador	2000
Material refletivo	280
Motor Stirling	3 600
Sensores	525
Arduíno	500
Outros	2 500
9 405 ECV	

Tabela 10: Custo do protótipo

Fonte: Própria

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS

O experimento foi realizado no terraço da minha casa, onde nenhum obstáculo ou outras construções pudesse fazer sombra sobre o concentrador solar, no dia 2 de Julho de 2019, o céu estava praticamente limpo, com pouquíssimas nuvens.

O objetivo de realizar a análise experimental do sistema é indicar a temperatura na parte externa do recetor e na parte interna ao recetor, rotação do gerador, tensão e corrente. A aquisição dos dados da corrente e tensão, foi utilizado um multímetro digital.

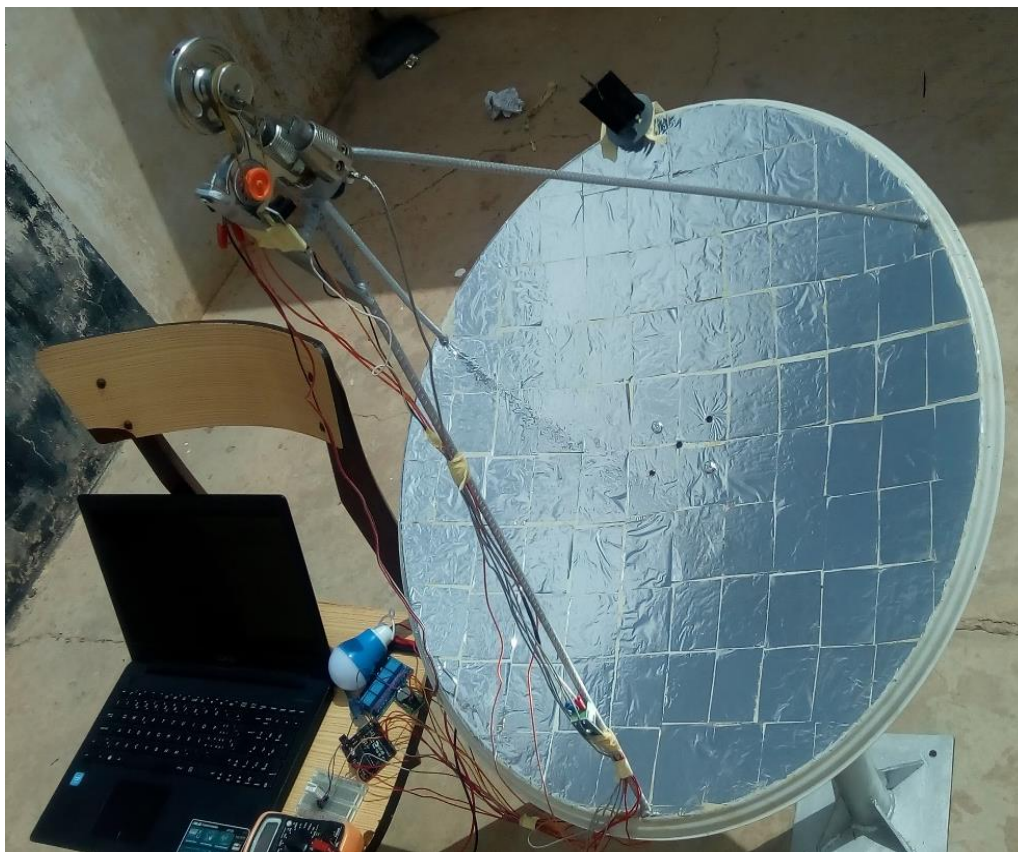


Figura 49: Análise experimental do sistema construído

Fonte: Própria

Como forma de medir a corrente, instalou na saída do gerador uma lâmpada led de 5 W que é alimentado em corrente contínua. Relativamente aos dados da temperatura no recetor este apresentou um máximo de 245 °C.

É evidente que para o caso do servomotor de movimentação horizontal do seguidor solar, constatou a necessidade de ter um servomotor mais robusto para mover o concentrador com maior facilidade.

A tabela 11 mostra os resultados do teste realizado no sistema.

Hora	Tensão	Corrente	RPM	Temperatura no Interior do recetor	Temperatura no Exterior do recetor
11:00	4,2	0,6	1232	198	25
12:00	4,7	0,85	1401	212	26,3
13:00	4,82	1,01	1652	245	29,1

Tabela 11: Resultado da análise experimental do sistema

Fonte: Própria

6 ANÁLISE ECONÓMICA DE UMA CENTRAL DISH STIRLING

Como forma de demonstrar a viabilidade económica de um sistema Disco Stirling em São Vicente, considerou-se um sistema com potência de 500 KW conectado com a rede elétrica. Com base nos dados do Anexo 5 foi calculado o custo do sistema a instalar (Tabela 12).

Custo do concentrador solar de disco parabólico	
Equipamento	US \$/ kW
Concentrador	1 400 000
Recetor	60 000
Motor Stirling	850 000
Gerador	25 000
Sistema Refrigeração	30 000
Material Elétrico	25 000
Custo de Instalação	
Engenharia	300 000
Operação	125 000
Custo de operação e Manutenção	
Mão-de-obra	6 000
Materiais	4 500
TOTAL	2 825 500 US \$

Tabela 13: Custo de um sistema Dish Stirling de 500 kW

Fonte: Própria

Para saber o número de concentrador, no projeto usou o concentrador PowerDish que tem as seguintes características:

- ✓ Funciona em altas temperaturas;
- ✓ Manutenção muito baixa - 25 anos de vida útil;
- ✓ Não há necessidade de água, exceto para lavagem periódica;
- ✓ Adequado para instalação em terrenos inclinados e colinas;
- ✓ Impacte ambiental mínimo;

- ✓ Reduzido uso da terra;
- ✓ Operação remota;
- ✓ A instalação é mais rápida do que as outras formas de concentração solar;
- ✓ Certificado e seguro para a rede elétrica.

A tabela abaixo mostra as especificações técnicas do concentrador escolhido:

Potência	3,5 KW Trifásico
Eficiência	24%
Fluído trabalho do motor	Hélio
Refrigeração	Em circuito fechado (Manutenção em 5 em 5 anos)
Rastreamento	A dois eixos
Diâmetro do concentrador	4,7m
Altura do concentrador	6,4 m
Peso	860 kg
Nível Ruído	65 Db a 10 metros

Tabela 14: Especificações técnicas do PowerDish

Fonte: www.powerplaysolar

Para uma central com essas características é necessário 143 PowerDish.

Em São Vicente, nos cálculos referente ao dimensionamento de projeto de energia solar, quer para produção de água ou energia utiliza-se como referência 6 horas de sol pleno. Com isso em termos anuais o sistema irá produzir 1081 MWh de energia.

O custo de energia elétrica gerada pelo concentrador solar de disco parabólico, é calculado com a Equação do Quadro 2, com a taxa de juros 8,75% em comparação com o custo médio de eletricidade em baixa tensão em Mindelo (0,326US\$/kWh). O Gráfico 8 mostra a variação do custo de eletricidade ao longo dos anos de vida do projeto.



Gráfico 8: Custo de energia em função dos anos

Fonte: Própria

Com base no gráfico acima, no primeiro ano de operação do projeto, por causa do elevado investimento inicial, este apresenta um custo de eletricidade de 2,2 US\$. Mas ao longo dos anos este valor vai diminuindo, tendo obtido um custo de 0,312 no décimo mês.

Para efetuar a análise da viabilidade económica do projeto utilizou o software Retscreen, tendo o seguinte gráfico do fluxo de caixa do projeto.

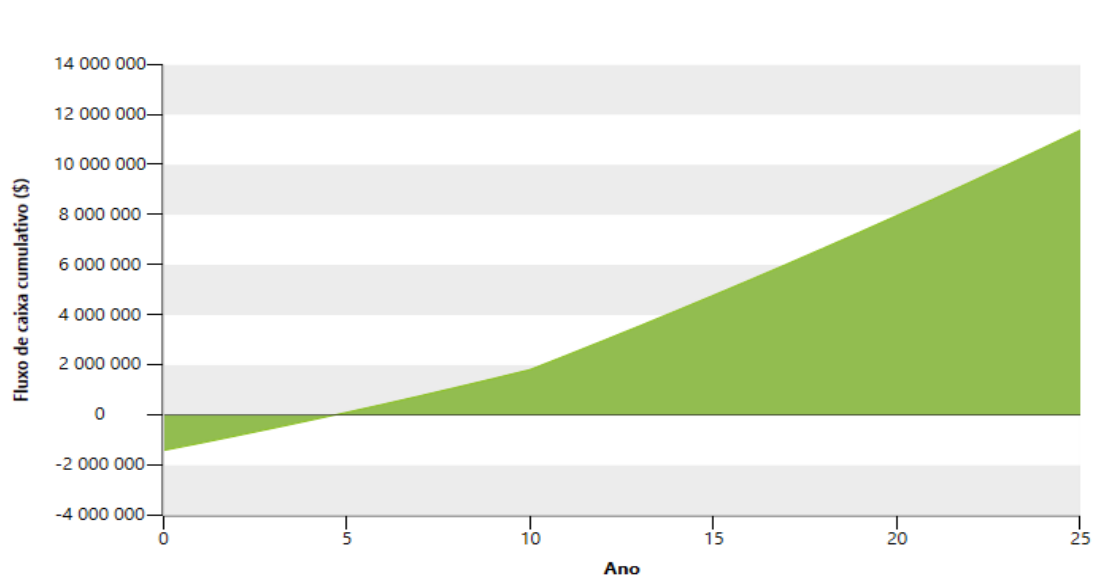


Gráfico 9: Receitas anuais em função dos anos do projeto

Fonte: própria

Na Tabela 15 é apresentado os dados da viabilidade económica do projeto. Da análise feita no software Retscreen, o investimento inicial do projeto é facilmente recuperável em menos

de 6 anos. Por ser uma tecnologia em fase de desenvolvimento considere esses dados financeiros satisfatórios.

TIR antes impostos-capital próprio	%	24.3%
TIR antes impostos - ativos	%	13.3%
Retorno simples	ano	5.7
Retorno do capital próprio	ano	4.6

Tabela 15: Viabilidade econômica

Fonte: Própria

7 IMPACTE AMBIENTAL

A instalação de sistemas de concentradores de disco parabólico com motores stirling para produção de energia elétrica apresenta um impacto ambiental relativamente baixo. Dentro desses impactes destaca-se a utilização de água no resfriamento do motor e do óleo lubrificante, em que o derrame do mesmo apresenta riscos ao ambiente.

Não há libertação de gases poluentes e a energia produzida é gratuita e renovável.

Quando comparado com as outras tecnologias que utilizam o sol como fonte energética, como por exemplo um sistema solar fotovoltaico, o sistema de disco parabólico apresenta a vantagem de ser construído com materiais facilmente recicláveis.

O espaço que ocupa é muito pequeno quando comparado com os outros sistemas CSP. A localização do sistema é sujeita apenas ao estudo das sombras, à energia solar projetada e aos limites de vento e neve.

O motor Stirling tem vibrações muito baixas, bem como os motores elétricos do sistema posicionamento e de conversão de energia.

Aprofundando a emissão de CO₂ e outros gases contaminados, estes são apenas produzidos no processo de fabricação do dispositivo, dependendo também de onde a energia é extraída.

8 CONCLUSÃO

O objetivo principal do projeto foi alcançado satisfatoriamente, procurando em cada caso, a melhor solução tendo em conta os recursos disponíveis.

O design do concentrador solar de disco parabólico foi projetado, levando em consideração vários aspetos, como a velocidade do vento, a refletividade e o custo. Através das análises teóricas efetuadas, realçam-se dois aspetos fundamentais dos concentradores solar de disco parabólico, o seu diâmetro e o revestimento da sua superfície.

Estes são dois fatores preponderantes que condicionam a eficiência do sistema. A refletividade do concentrador deve ser a máxima possível, garantindo as mínimas perdas e o máximo aproveitamento da radiação solar. Por outro lado, o diâmetro do concentrador condiciona o calor útil alcançado pelo sistema. Quanto maior o diâmetro, maior é a concentração da radiação solar, maior a temperatura alcançada na superfície do recetor e consequentemente maior o calor transferido para o fluido de trabalho do motor Stirling.

Tal como se pode concluir no projeto, as nuvens diminuem drasticamente a passagem da radiação solar direta. As suas consequências podem ser minimizadas, mas nunca controladas. Para além das nuvens, o vento é outro fator que leva à diminuição do rendimento do sistema, através das perdas de calor por convecção.

A elaboração do balanço térmico permitiu comprovar a influência que tem os fatores como: rastreamento solar ótimo, projeto geométrico e materiais usados na fabricação do sistema, sobre a eficiência global do mesmo.

Os objetivos proposto ao longo do trabalho foram alcançados, sendo que com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que este sistema é ideal para Cabo Verde por causa da grande quantidade de radiação solar disponível no território.

Com base nos dados da análise financeira, o concentrador solar de disco parabólico é uma alternativa viável para produção de energia elétrica com o motor o Stirling.

A primeira hipótese delimitada no estudo é refutada porque a rotação do motor irá depender da radiação solar incidente no concentrador e das suas características. Muitas vezes para regular a potência na saída é aplicado sistemas de conversores de eletrônica de potência no gerador ou por meio da variação da pressão no interior do motor.

A aplicação de um sistema Dish Stirling híbrido utilizando biogás e energia solar podem ser uma boa solução para aumentar a oferta de geração distribuída, permitindo diminuir os impactos ambientais.

9 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- ✚ Construção de um sistema de monitoramento baseado em internet das coisas,
- ✚ Avaliação do motor Stirling utilizando biogás como combustível para várias potências elétricas;
- ✚ Realização de um estudo mais minucioso e aprofundado nos sistemas de acionamentos do motor Stirling;
- ✚ Construção de um sistema híbrido que possa operar com biogás e energia solar simultaneamente.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbas, A. (2000). *Solchrome Solar Selective Coatings An Effective Way For Solar Water Heaters Globally*. Renewable Energy, v. 19, n. 2, p. 145–154.

Abete, A. J. (2013). *Testing And Optimization Of The Performance Of Stirling Engine*. Hochschule Osnabrück.

Barbosa, F. (2015). *Desenvolvimento De Um Concentrador Solar Com Sistema De Seguimento*. Dissertação De Mestrado, Universidade do Minho, Minho.

Barreto, G. R. (2015). *Modelação De Um Motor De Stirling Com Concentração De Radiação Solar*. Dissertação De Mestrado, Universidade de Évora, Évora.

Bianchini, H. (2013). *Concentração De Energia Solar Para Geração De Potência Elétrica*. Focusolar, Rio de Janeiro.

Bowman, R., Ritzert, F., & Freedman, M. (2004). *Evaluation Of Candidate Materials For A High-Temperature Stirling Convertor Heater Head*. v. 44, n. 216, p. 821–828.

Bravo, Y., Serra, L. M., Monné, C., Alonso, S., Moreno, F., & Muñoz, M. (2011). *Environmental Evaluation Of Dish-Stirling Technology For Power Generation*. Solar Energy, v. 86, p. 2811-2825.

Caballero, G. E. (2013). *Estudo E Modelagem Dos Componentes De Um Sistema Dish Stirling Visando À Otimização Da Potência E A Eficiência Do Sistema*. Universidade Federal de Itajubá.

Cantor, I. B. (2008). *Desenvolvimento De Um Motor Stirling Acoplado A Uma Placa Parabolica Coletora De Energia Solar*. Universidade de Sao Francisco, Sao Paulo, Brazil.

Carvalho, C. R. (2013). *Carvalho, C. R. F. (2013). Sistema Fotovoltaico Isolado: Uma Aplicação Prática No Projeto Xapuri*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Minas Gerais.

Cortez, R. (2013). *Sistema De Seguimento Solar Em Produção De Energia Fotovoltaica*. Dissertacao Mestrado, Porto.

Castellanos, L. S. (2012). *Modelagem De Sistemas De Geração De Electricidade A Partir Da Energia Solar Utilizando Pratos Parabólicos E Motores Stirling (Dish Stirling)*. Dissertação de Mestrado , Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brazil.

Costa, J. M. (2013). *Metodologia Simplificada Para A Análise Termoeconómica De Sistemas De Cogeração Com Motor Stirling*. Universidade do Minho, Portugal.

Coventry, J., Andraka, C. P., Blanco, M., & Fisher, J. (2015). *A Review Of Sodium Receiver Technologies For Central Receiver Solar Power Plants*. Solar Energy, v. 122, p. 749–762.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering Of Thermal Processes*. Six Edition , John Wiley & Sons, New York.

Esteve, J. G. (2010). *Disseny D'un Captador Solar D'alta Temperatura, Amb Motor Stirling I Disc Parabòlic*. UPC – Universitat Politècnica de Catalunya.

Fareed, M., & Auatf, S. (2012). *Design And Study Of Portable Solar Dish Concentrator*. International Journal of Recent Research and Review, Iraq. ISSN 2277-8322. v. 3.

Foster, R., Chassemi, M., & Cota, A. (2010). *Solar Energy*. CRC Press Taylor & Francis Group.

Fraser, P. R. (2008). *Stirling Dish System Performance Prediction Model*. University Of Wisconsin-Madison.

Gesto Energy Solutions. (2011). *Plano Energerico Renovavel Cabo Verde, Estudo Do Recurso Solar*. Cabo Verde.

Ghani, A., Ruddin , M., & Affandi, R. (2014). *Development Of Design Parameters For The Concentrator Of Parabolic Dish (PD) Based Concentrating Solar Power (CSP) Under Malaysia Environment*. v. 8, p. 9- 42.

Ghani, A., Ruddin, M., Gan, C. K., & Affandi, R. (2014). *Development Of Design Parameters For The Concentrator Of Parabolic Dish (PD) Based Concentrating Solar Power (CSP) Under Malaysia Environment*. v. 48, n. 42 p. 9.

Goswami, D. Y. (2000). *Principles Of Solar Engineering*. Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group.

Günther, M., & Shahbazfar, R. (2009). *Solar Dish Technology, Advanced Csp Teaching Materials*. Enermena.

Hafez, A. Z., Soliman, A., Metwally, K. A., & smaeL, I. M. (2015). *Solar Parabolic Dish Stirling Engine System Design, Simulation, And Thermal Analysis*. Energy Conversion and Management, v. 126, p. 60–75.

Hoegel, B. (2014). *Thermodynamics Based Design Of Stirling Engines For Low-Temperature Heat Sources* . Canterbury.

Holbert, K. E., & Haverkamp, C. J. (2009). Impact Of Solar Thermal Power Plants On Water Resources And Electricity Costs In The Southwes, North American Power Symposium (NAPS). Institute of Electrical and Electronic Engineer (IEEE).

Howard, D. F. (2010). *Modeling , Simulation , And Analysis Of Grid Connected Dish-Stirling Solar Power Plants*. Georgia Institute of Technology.

IEA. (2018). *World Energy Balances*, Obtido em 15 de Fevereiro de 2019, de http://wds.iea.org/wds/pdf/WORLDBAL_Documentation.pdf.

Incropera, F. P., De Witt, D. P., & Bergman, T. (2008). *Fundamentos De Transferência De Calor E De Massa*. Sexta Edição, LTC, Rio de Janeiro.

International Energy Agency (IEA). (2010). Obtido em 10 de Fevereiro de 2019, de www.iea.org

Isaac, D. J. (2002). *Fluid Heat Exchanger*. vol. 10, n. 28, p. 145–162.

Iwamoto, S., Hiratas, S. K., & Tota, F. (2001). *Performance Of Stirling Engines (Arranging Method Of Experimental Results And Performance Prediction)*. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 635, n. 65, p. 361–368.

Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: Processes And Systems*. Two Edition, Elsevier Science.

Klein, S. A. (1978). *Calculation Of Flat-Plate Collector Utilizability*. Solar Energy, vol. 21, n 5, pp. 393–402.

Lavado, A. L. (2009). *Os Atuais Desafios Da Energia, Implementação E Utilizacao Das Energias Renovaveis*. Dissertacao de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Madeira, R. A. (2009). *Custos Associaados A Energia Termo Solar De Recepptor Central*. Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio Janeiro, Brazil.

Mancini, T., Heller, P., Osborn, B., Schiel, W., Goldberg, V., Buck, R., . . . Moreno, J. (2003). , T.; Heller, P; Butler, B.; Osborn, B.; Schiel, W.; Goldberg, V.; Buck, R.; Diver, R.; Andraka, C.; MOreno, J. (2003). *Dish-Stirling Systems: An Overview Of Development And Status*. Journal of Solar Energy Engineering, v. 125, n. 2, p. 135.

Mille, A., & Lumby, B. (2012). *Utility Scale Solar Power Plants: A Guide For Developers And Investors* . International Finance Corporation.

Morton, O. (2006). *Solar Energy: A New Day Dawning: Silicon Valley Sunrise*. Nature, v. 443, n. 7107, p.19–22.

Pereira, P. S. (2010). *Energia Solar Térmica: Perspetivas Do Presente E Do Futuro*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). *Manual De Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos*. 1 Edição, Rio Janeiro.

Ramos, J. A. (2015). *Thermodynamic Analysis Of Stirling Engine Systems Applications For Combined Heat And Power*. KTH School of Industrial Engineering and Management.

Rodrigues, N. P. (2017). *Sistema De Microgeração De Energia Com Base Num Motor Stirling*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa .

Sandia, R. (2001). *Solar Thermal Utility-Scale Joint Venture Program (Usjvp) Final Report* . New Mexico and California.

Santos , L. P. (2014). *Estudo Da Utilização Do Motor Stirling Na Geração De Energia Heliotérmica*. UNIFACS - Universidade de Salvador. Salvador.

Bergermann, S. e Partner, A. (2001). *EuroDish – Stirling System Description*,. A new decentralised Solar Power Technology, Stuttgart.

Schweitzer, A., Schiel, W., Keck, T., & Kern, J. (1992). *Third Generation Dish/Stirling Technology-Testing In Continuous Operation-System Description And Initial Results*. Proceedings of the 6th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Mojacar, Spain,.

Severo, T. C. (2005). *Desenvolvimento Do Módulo Fotovoltaico Concentrador Estático Helius Para Sistemas Autônomos*. Dissertação Mestrado, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre .

Simmers, D. E. (2001). *A Low-Cost Solar Dish Design Utilizing a Stretched Membrane Reflector*. Obtido em Abril de 10 de 2019, de www.abetterfocus.com.

SolarPaces. (2018). Obtido em 5 de Maio de 2019, de www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world.

Stine, W., & Geyer, M. (2001). *Power From The Sun* . Obtido em 5 de Janeiro de 2019, de www.powerfromthesun.net/book.html

Stirling Energy Systems. (2007). *Solar Dish Stirling Systems Report*. NREL CSP Technology Workshop.

Thakkar, V., Doshi, a., & Rana, A. (2015). *Performance Analysis Methodology For Parabolic Dish Solar Concentrators For Process Heating Using Thermic Fluid*. Journal of Mechanical and Civil Engineering. ISSN: 2278-1684. v. 12, p.101-114, 2.

Urieli, I. (2008). *Stirling Cycle Machine Analysis*. p. 1–17.

Walker, G. (2002). *Stirling Engines*. Oxford University Press.

Zarza, E., & Hennecke, K. (2000). *Direct steam generation in parabolic troughs (diss), the first year of operation of the diss test facility on the plataforma solar de Almeria.*, International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Espanha.

11 ANEXOS

Anexo 1: Produtores De Energia Em Cabo Verde

Produtores	Potência Instalada, MW	Energia Produzida em 2017, KWh	Sistema de Produção
Electra, S.A. (*)			- Produção térmica (13 Centrais)
Santo Antão	8,8	14.302.907	- Produção eólica (1 Parque eólico)
São Vicente	28,7	74.002.153	- Produção solar fotovoltaico (2 parques solares)
S. Nicolau	4,22	6.569.879	
Sal	13,55	56.540.041	
Maio	1,376	2.708.270	
Santiago	88,275	224.997.317	
Fogo	7,0	13.418.555	
Brava	1,056	2.683.872	
Total	152,977	395.222.994	
Cabeólica, S.A. (*)			Produção eólica (4 Parques eólicos, compostos por 30 turbinas)
São Vicente	5,95	18.264.000	
Sal	7,65	17.227.000	
Boavista	2,55	7.883.000	
Santiago	9,35	32.052.000	
Total	25,5	75.426.000	
Águas e Energia de Boavista	15,104	31.408.615	- Produção térmica - Produção eólica
Águas de Ponta Preta (Sal)	6,2	26.105.687	- Produção Térmica (1 Central elétrica) - Produção eólica (2 Parques eólicos) Produção solar fotovoltaico (2 parques solares)
Electric Wind (Santo Antão)	0,5	760.908	Produção Eólica (2 unidades eólicas)

Quadro 1: Produtores de energia em Cabo Verde


Fonte: cvtradeinvest.com

Anexo 2: Dados Climáticos De Mindelo ⁷

Country - region Cape Verde

Province / State n/a

Climate data location Mindelo



Latitude	°N	16.9	Source
Longitude	°E	-25.0	
Elevation	m	63	
Heating design temperature	°C	18.1	
Cooling design temperature	°C	29.6	
Earth temperature amplitude	°C	2.4	NASA

	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days	Cooling degree-days
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Jan	21.7	73.1%	4.63	101.4	7.4	22.9	0	363
Feb	21.3	75.5%	5.49	101.4	6.7	22.2	0	316
Mar	21.5	75.7%	6.57	101.3	6.1	22.2	0	357
Apr	22.1	74.5%	7.61	101.3	6.4	22.5	0	363
May	22.7	74.3%	7.76	101.4	6.2	22.8	0	394
Jun	23.6	76.2%	7.22	101.4	6.0	23.4	0	408
Jul	24.6	77.2%	6.70	101.3	4.6	24.5	0	453
Aug	25.8	79.5%	6.08	101.2	4.4	26.0	0	490
Sep	26.4	80.9%	6.02	101.2	5.0	26.7	0	492
Oct	26.0	78.6%	5.43	101.2	5.7	26.6	0	496
Nov	24.7	75.2%	4.78	101.2	5.9	25.8	0	441
Dec	22.9	74.0%	4.27	101.3	6.6	24.3	0	400
Annual	23.6	76.2%	6.05	101.3	5.9	24.2	0	4 972
Source	Ground	NASA	Ground	Ground	NASA	NASA	Ground	Ground

Measured at

m

10

0

⁷ Esses dados foram retirados do software Retscreen, usado para realizar a análise da viabilidade económica do sistema concentrador solar de disco parabólico com potência de 500 kW

Anexo 3: Ciclo Stirling

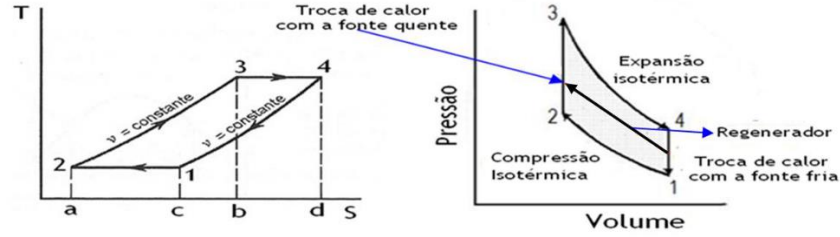


Gráfico 10: Ciclo termodinâmico do motor Stirling

Fonte: Bowman *et al.*, 2004

Para calcular o trabalho realizado pelo ciclo, pode-se utilizar o diagrama P–V mostrado na Gráfico 10, onde se obtém expressões diferentes (Enríquez e Guadalupe 2011, *apud* Castellanos, 2012):

Processo 1-2: saída de calor a uma temperatura constante.

$$W_{1-2} = n \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (31)$$

Processo 2-3: acumulação de calor no regenerador a volume constante.

$$w_{2-3} = \int_{V_2}^{V_3} p \cdot dV = 0 \quad (32)$$

Processo 3-4: entrada de calor à temperatura constante.

$$W_{3-4} = n \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (33)$$

Processo 4-1: Regenerador a volume constante.

$$w_{4-1} = \int_{V_1}^{V_4} p \cdot dV = 0 \quad (34)$$

Anexo 4: Especificações técnicas dos sensores

a) Especificações Técnicas DHT22

Tensão de operação: 3-5V (5,5V);

Faixa de medição de humidade: 0 a 100% UR;

Faixa de medição de temperatura: -40° a +80°C;

Corrente: 2,5mA máxima durante uso;

Precisão de medição de humidade: $\pm 2,0\%$;

Precisão de medição de temperatura: $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Dimensões: 25 x 15 x 7mm.

b) Especificações técnicas do Sensor velocidade

Tensão de Entrada: 3.3-5V;

Abertura disco encoder: 5mm;

Saída Digital e Analógica;

CI Comparador LM393;

Led indicador para tensão;

Led indicador para saída digital.

Anexo 5: Análise Económica

O Quadro 2 mostra as principais equações a serem seguidas para realizar a análise da viabilidade económica de um sistema disco stirling.

Descrição	Parâmetros das equações	Parâmetros das equações
Custo de energia elétrica	$C_{els} = \frac{I_{ps} \cdot f}{H \cdot E_p} + C_{man_s}$	<p>I_{ps} – Investimento da planta solar (US\$)</p> <p>$f$ – Fator de anuidade baseada na taxa de juros</p> <p>H – Período equivalente de utilização (horas/ano)</p> <p>E_p – Potência Instalada (KW)</p> <p>C_{man_s} – Custo de manutenção do sistema solar (US\$/kWh)</p>
Fator de anuidade	$f = \frac{q^k \cdot (q - 1)}{q^k - 1}$ $q = 1 + \frac{r}{100}$	<p>r – Taxa de juros</p> <p>k – Período de amortização (anos)</p>
Receita anual esperada	$GP_{els} = E_p \cdot H \cdot (C_{el} - C_{els})$	<p>E_p – Potência Instalada (kW)</p> <p>H – Período equivalente de utilização (horas/ano)</p> <p>C_{el} – Tarifa de eletricidade utilizada (US\$/kWh)</p> <p>$C_{els}$ – Custo de energia elétrica produzida no sistema solar (US\$/kWh)</p>

Quadro 2: Análise da viabilidade económica de um sistema disco Stirling

Fonte: Adaptado de Dentello, 2017

I. Estimativa do custo dos componentes do concentrador solar de disco parabólico

Equipamento	US \$/ kW (2010)
Concentrador	2800
Recetor	120
Motor Stirling	1700
Gerador	50
Sistema Refrigeração	60
Material Elétrico	50

Tabela 16: Custo dos componentes do concentrador solar de disco parabólico

Fonte: SolarPaces, 2018

II. Estimativa do custo de instalação do motor stirling funcionado com energia solar

Instalação	US \$/ kW (2010)
Engenharia	600
Custo de arranque	250

Tabela 17: Custo de instalação do motor stirling funcionado com energia solar

Fonte: SolarPaces, 2018

III. Estimativa do custo de operação do motor stirling funcionado a energia solar

Operação e Manutenção	US \$/ kW (2010)
Mão-de-obra	12
Materiais	9

Tabela 18: Custo de operação do motor Stirling funcionado a energia solar

Fonte: SolarPaces, 2018

Anexo 6: Determinação Do Coeficiente De Arrasto

O gráfico abaixo, mostra como podemos determinar o coeficiente de arrasto, para calcular a força aerodinâmica.

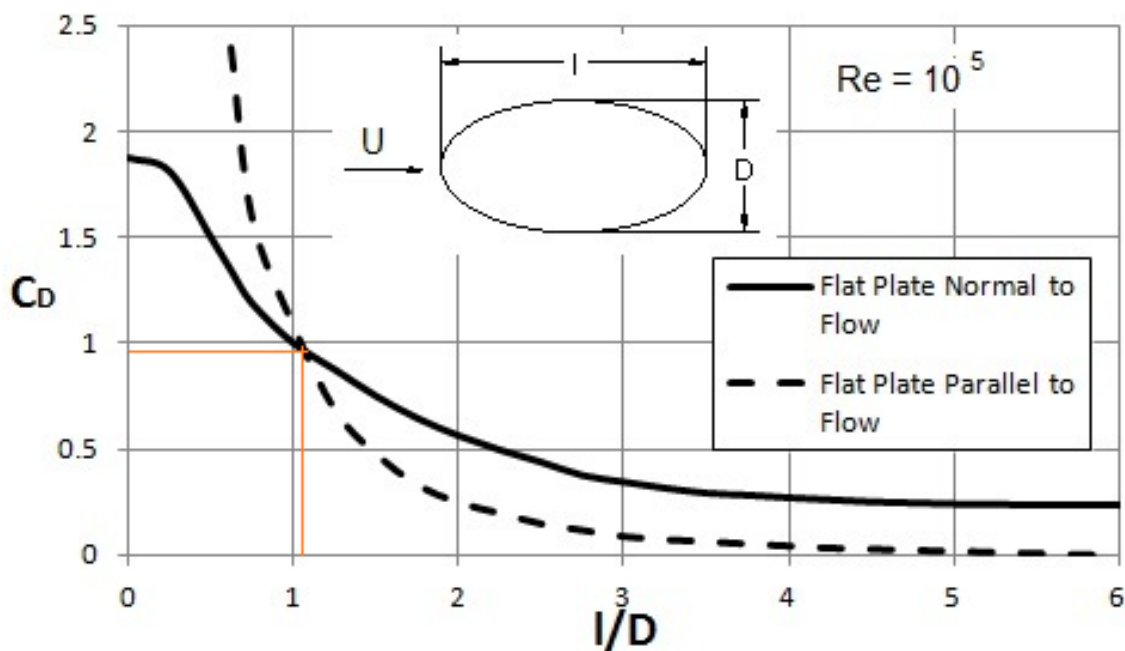


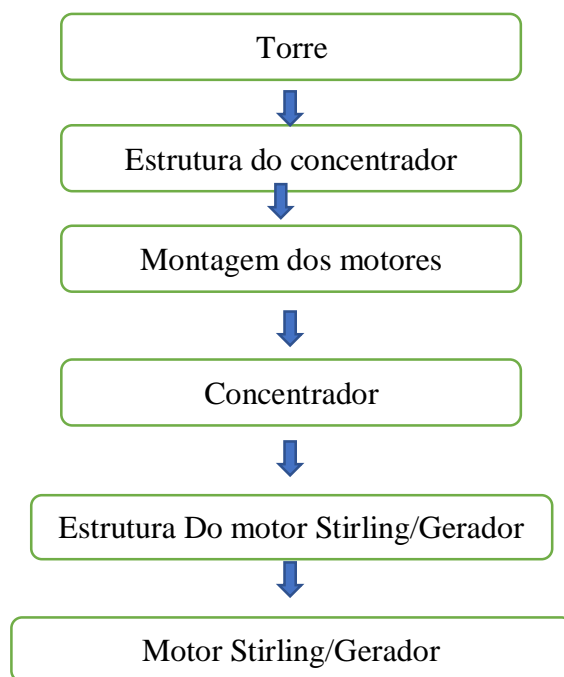
Gráfico 11: Variação do coeficiente de arrasto em função das dimensões da elipse

Fonte: Adaptado Amirault 2015, *apud* Castellanos, 2012

Anexo 7: Manual De Construção E Instalação

Este manual contém toda a informação necessária para a correta construção e instalação do protótipo do concentrador solar de disco parabólico, que possui um seguidor solar em dois eixos.

O diagrama seguinte mostra os passos a seguir para efetuar a devida montagem do sistema:



9.1 Torre

Para a fabricação da torre seguiu os seguintes passos:

- ✚ A base da torre cotem dimensões de 230*230 mm e espessura de 8 mm;
- ✚ No centro da base é colocado um tubo de 60 mm de diâmetro por 600mm de altura;
- ✚ Este é soldado na base e a volta é colocado quatro chapas para garantir uma melhor estabilidade;
- ✚ Deve ser aplicado uma pintura anticorrosiva.

A Figura 50 mostra a torre construída.



Figura 50: Torre construída

Fonte: Própria

9.2 Estrutura do concentrador

A Figura 51 mostra a estrutura do seguidor solar construída, sendo que para isso é necessário seguir os seguintes passos:

- ✚ Cortar as peças e efetuar a soldagem das mesmas;
- ✚ Na peça inferior da estrutura fez-se dois furos de 10 mm, para a passar o veio de 9mm.
- ✚ Nas duas extremidades do veio é colocado dois mancais, onde é colocado dois rolamentos, para que o veio gire livremente.

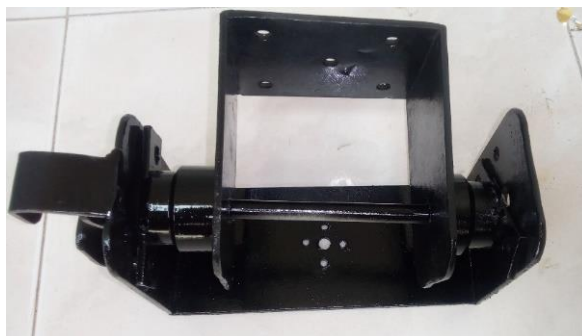


Figura 51: Fabricação da estrutura do concentrador

Fonte: Própria

9.3 Montagem dos servomotores

Para a montagem dos servomotores seguiu os seguintes passos, conforme pode ser visualizada na Figura 52:

- ✚ No servomotor de movimentação horizontal, é parafuso em cima da torre, e depois é efetuada a sua união com a estrutura do concentrador;
- ✚ No servomotor de movimentação vertical, foi soldado no centro uma chapa para fixar o mesmo com parafusos.



Figura 52: Montagem dos servomotores

Fonte: Própria

9.4 Concentrador

No concentrador é aplicado 100 espelho com dimensões de 6,5*4,5 mm.



Figura 53: Aplicação dos espelhos no concentrador

Fonte: Própria

9.5 Estrutura Do motor Stirling/Gerador

No caso do suporte do concentrador segue os seguintes passos (Figura 54):

- ✚ O concentrador é dividido em 3 partes iguais, onde é efetuado furos de 8 mm para fixar na estrutura do concentrador;

- ✚ No ponto focal do concentrador é soldado o recetor, que será responsável para o aquecimento do gás de trabalho do motor stirling.



Figura 54: Estrutura de suporte do conjunto motor stirling/gerador

Fonte: Própria

9.6 Motor Stirling

O cilindro quente do motor Stirling é pintado com uma cor preta, para absorver uma maior quantidade de radiação solar. Este é ajustado no recetor e de seguida é fixa na chapa que foi soldado na estrutura do concentrador.

É de salientar que no recetor é instalado um sensor de temperatura e no gerador um medidor de velocidade (Figura 55).



Figura 55: Instalação do motor stirling

Fonte: Própria

Anexo 8: Código Do Sistema Controle

```
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 7
#define DHTTYPE DHT22
float temperatura;
#include "max6675.h"
int LABEL=1;
int linha=0;
int ktcSO = 8;
int ktcCS = 9;
int ktcCLK = 10;
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
int pino_D0 = 2;
int rpm;
volatile byte pulsos;
unsigned long timeold;
unsigned int pulsos_por_volta = 4;

void contador()
{
    pulsos++;
}

void setup(){
    dht.begin();
    Serial.begin(9600); //INICIALIZA A SERIAL
    attachInterrupt(0, contador, FALLING);
    pulsos = 0;
    rpm = 0;
    timeold = 0;
    Serial.println("LABEL, Date, hora, T_Recetor, Velocidade ,T_Ambiente, ");
}

void loop(){
    if (millis() - timeold >= 1000)
    {
        detachInterrupt(0);
        rpm = (60 * 1000 / pulsos_por_volta ) / (millis() - timeold) * pulsos;
        timeold = millis();
        pulsos = 0;
        attachInterrupt(0, contador, FALLING);
    }
}
```

```

    }

    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();

    linha++;
    Serial.print("DATA, ");
    Serial.print("DATE, ");
    Serial.print("TIME, ");
    Serial.print(ktc.readCelsius( ));
    Serial.print(", ");
    Serial.print(rpm);
    Serial.print(", ");
    Serial.print(t);
    Serial.print(", ");
    Serial.println( h);
    delay(5000);
}

```